NOVEMBER 2005 · € 6,90 (D/A)

DEUTSCHE AUSGABE DES SCIENTIFIC AMERICAN

Spektrum DER WISSENSCHAFT

- Glaube und Wissen: Streitgespräch mit Bischof Huber
- Das Erdbeben von Lissabon
- Alternatives Genom
- Roms Kampf um den Orient

www.spektrum.de



NATURPHÄNOMENE

Einschläge vom Himmel

Neue Forschung zeigt, dass Elektronen in Blitzen fast Lichtgeschwindigkeit erreichen

SERIE (TEIL II):

DIE WELT IM JAHR 2050

- Wege aus der Armut
- Wasser für die Landwirtschaft
- Erhalt der Biovielfalt

D6179E
13,50 sFr / Luxemburg 8,– €



Reinhard Breuer
Chefredakteur

Glaube, Wissen, Hoffnung

Es ist schon eine Weile her, dass wir das Thema »Wissenschaft und Religion« im Heft hatten, zuletzt als Streitgespräch (SdW 11/1999 und 6/2000). Schon damals verblüffte mich Ihre Reaktion: Im zugehörigen Online-Forum kommentierten und diskutierten bereits innerhalb weniger Tage über tausend Teilnehmer. Mit dem EKD-Vorsitzenden Bischof Wolfgang Huber hat jetzt der Wissenschaftsjournalist Martin Urban das Thema wieder aufgegriffen (S. 118).

Urban musste einige Zeit auf ein Treffen mit dem umtriebigen Kirchenmanager warten, das Gespräch fand Ende August in dessen Arbeitszimmer in Berlin statt. Dort amtiert Huber in seiner Eigenschaft als Bischof der evangelischen Kirche Berlin-Brandenburg-schlesische Oberlausitz. Beim Termin kam er gerade vom Weltkirchentag in Köln und einer Begegnung mit dem Papst zurück und hatte zwischendurch noch an der Beerdigung des in aller Öffentlichkeit ermordeten Frère Roger teilgenommen. Huber und Urban sind sich bereits in den 1980er Jahren begegnet, als sie in den Gremien des Deutschen Evangelischen Kirchentags zusammenarbeiteten.

Gesprächspartner Martin Urban entstammt einer Theologenfamilie. Der Großvater teilte sich mit Albert Schweitzer in Straßburg das Studentenzimmer sowie die studentische Vertretung der dortigen Theologischen Fakultät. »Weil mir das alles zu viel wurde, studierte ich Physik – habe aber mein Interesse an theologischen Fragen nie verhehlt«, verriet mir Urban. Der Weg führte ihn alsbald zur Süddeutschen Zeitung, deren Wissenschaftsressort er ab 1970 aufbaute und mehrere Jahrzehnte lang erfolgreich leitete. Viele junge Autoren brachte er auf diesem Wege überhaupt erst zum Wissenschaftsjournalismus, auch den Autor dieser Zeilen.

Als im September die Entzifferung des Schimpansengenoms verkündet wurde, hat das Ergebnis die Forscher zwar nicht mehr überrascht, aber mancher Laie mag noch geschockt worden sein. Denn verglichen auf der Ebene genetischer Buchstaben erscheint der Unterschied zum menschlichen Erbgut mit knapp 1,2 Prozent bestürzend winzig. Umso mehr will man nun herausfinden, was Menschen von anderen Primaten wirklich unterscheidet, wie in dieser Gruppe neue Gene und Arten entstanden sind, wie sich Besonderheiten im jeweiligen Krankheitsspektrum niederschlagen. Deshalb sind alle natürlich begierig, das Genom möglichst vieler der etwa 60 Primatenarten zu analysieren.

Dabei gilt, dass die eigentliche Arbeit erst nach dem Entziffern richtig beginnt. Jedes unserer rund 25 000 Gene dient im Schnitt für die Synthese von fast vier Proteinen. Je nach Lage entfachen diese Eiweißmoleküle in den Zellen ein gigantisches Feuerwerk an Reaktionen – alles zu entschlüsseln wird bei Mensch und Schimpanse et al. Jahrzehnte beanspruchen. Auch wenn die Hoffnung auf neue Medikamente groß ist, sollte man sich mit Geduld wappnen (S. 48).



NOVEMBER 2005

INHALT

SPEKTROGRAMM

FORSCHUNG AKTUELL

THEMEN

Titelbild: Gewitter über einer Großstadt: Blitze geben auch heute noch Rätsel auf
Bild: Corbis

Die auf der Titelseite angekündigten Themen sind mit ▶ gekennzeichnet
🔊 Diesen Artikel können Sie auch anhören, siehe: www.spektrum.de/audio

Aus urheberrechtlichen Gründen können wir Ihnen die Bilder leider nicht online zeigen.

SEITE 24

ARCHÄOLOGIE

Krieg in der Wüste

Im Orient erfuhr das römische Imperium manche Demütigung im Krieg gegen die persischen Sasaniden-Könige. Erst eine konsequente Heeresreform sicherte den Limes im Osten



SEITE 48

MOLEKULARGENETIK

Ein Bauplan – viele Lesarten

Angesichts seiner Komplexität hat der Mensch erstaunlich wenig Gene. Des Rätsels Lösung: Die Genelemente lassen sich in alternativen Kombinationen nutzen

Aus urheberrechtlichen Gründen können wir Ihnen die Bilder leider nicht online zeigen.

SEITE 84

SEISMOLOGIE

Das Erdbeben von Lissabon

Vor 250 Jahren zerstörte das schwerste historisch belegte Erdbeben innerhalb Europas die Hauptstadt Portugals. Seine Ursache war lange unklar, lässt sich aber heute rekonstruieren



SERIE: DIE WELT IM JAHR 2050 Teil II

Menschheit am Scheideweg

Extreme Armut ist vermeidbar. Bewässerungssysteme für Kleinbauern in der Dritten Welt sind erschwinglich. Auch die Lebens- und Artenvielfalt lässt sich gleichfalls kostengünstig erhalten.



NOVEMBER 2005

REZENSIONEN

PHYSIKALISCHE UNTERHALTUNGEN

JUNGE WISSENSCHAFT

KOMMENTARE

WISSENSCHAFT IM …

WEITERE RUBRIKEN

SPEKTRUM-PLUS.DE
ZUSATZANGEBOT FÜR ABONNENTEN



Wir sind alle Afrikaner

Genetische Analysen beweisen immer klarer, dass der moderne Mensch aus Ostafrika stammt

ZUGÄNGLICH ÜBER WWW.SPEKTRUM-PLUS.DE NACH ANMELDUNG MIT KUNDENNUMMER

ID versus Stringtheorie

»Kardinalsünde«, Springers Einwürfe, September 2005

Es lohnt sich immer, Springers Einwürfe zu lesen. Diesmal mündet der Einwurf in einen fulminanten Exorzismus. Zu diesem Zweck war er wohl auch geschrieben. Nicht ganz so lustig ist die Vorgehensweise, den kruden Kreationismus und die gar nicht so dumme Hypothese des »Intelligent Design« in denselben Topf der Lächerlichkeit zu werfen. Über die sehr spekulative Hypothese des ID lässt sich nämlich mit guten Gründen streiten, unabhängig von den Absichten des Grafen von Schönborn. Die Auffassung, dass aus der Beschaffenheit des Weltalls und dem Verlauf der Evolution auf einen dahinterstehenden intelligenten Plan einer Macht, die wir Gott nennen, geschlossen werden kann (nicht muss!), lässt sich empirisch genauso wenig überprüfen wie derzeit die Annahme von elf Dimensionen in der erweiterten Stringtheorie, die uns mehr Glauben abverlangt, als Josef Ratzinger es sich jemals zu tun getrauen würde. Auch die Evolutionstheorie ist nicht so allseitig erklärungskräftig, wie manche glauben. Wäre sie unwiderlegbar, müsste Sir Karl doch sehr die Nase rümpfen.

Spaß beiseite. Die ganze Diskussion steht und fällt mit der Antwort auf die Frage: Existiert Gott? Wer meint, dass es keinen Gott gibt, kann die ganze Sache ad acta legen, denn die »Hypothese Gott« ist überflüssig und daher nur störend. Nur wer an Gott glaubt, hat das Problem, erklären zu müssen, wie sein Gottesverständnis und die Erkenntnisse der modernen Naturwissenschaft zusammenpassen. Dabei sollte er allerdings der Kraft des besseren Arguments vertrauen und sich nicht hinter Amt und Würden verstecken und erst recht sich nicht auf die Autorität des toten Papstes berufen (wie Chr. v. Schönborn), denn die Toten lassen sich schlecht befragen. Immer gilt aber: Auch die Naturwissenschaften reden in Gleichnissen und alle unsere Erkenntnisse über Gott und die Welt sind Konstruktionen des menschlichen Geistes. Und der kann mächtig irren.

Dr. Kuno Füssel, Andernach

Keine Spur von Brückenkopf

»Kardinalsünde«, Springers Einwürfe, September 2005

Ich bin seit zehn Jahren Pfarrer in Niederösterreich, wo sich das erwähnte Internationale Theologische Institut (ITI) befindet. Bis jetzt habe ich von Seiten der Studenten oder Professoren nichts gespürt, dass sich ein »Brückenkopf für amerikanische Kreationisten« gebildet hat. Über eine unreflektierte Gegnerschaft zur Naturwissenschaft braucht man sich daher keine Sorgen zu machen.

Norbert Burmettler, Gaming

»Seepferdchen« im Gehirn?

»Früherkennung von Alzheimer«, Spektrogramm, September 2005

Der Hippocampus wird zwar oft als seepferdchenförmig beschrieben, aber das ist nicht korrekt. Am Hippocampus gibt es eine hufartige Struktur, den »Pes Hippocampus«, und Seepferdchen haben nun mal keinen Huf.

In der griechischen Mythologie gibt es allerdings ein Fabelwesen namens »Hippokampos«, eine Art Meerpferd, halb Fisch, halb Pferd. Deswegen wurde der Hippocampus von den alten Anatomen nach diesem Fabeltier benannt, und nicht nach »unserem« Seepferdchen.

Jonas Stroeder, Hamburg

Komplexe Immunantwort

»Frühwarnsystem gegen Erreger«, August 2005

Das immunologische Frühwarnsystem unseres Körpers umfasst neben Toll-artigen Rezeptoren weitere ebenso wichtige Komponenten. Diese werden jedoch im Beitrag vernachlässigt. Zum Beispiel dienen die Familien der so genannten CL- und NL-Rezeptoren gleichfalls der Erkennung von Krankheitserregern und können eine umfangreiche Immunantwort mit Entzündungsreaktionen auslösen. Ein bekannter Vertreter der ersten Familie ist der Rezeptor DC-SIGN für das Aids-Virus und einige krankheitserregende Bakterien.

Zwei bedeutende Mitglieder der zweiten Familie sind NALP3 und NOD2. Eine Fehlfunktion auf Grund von Mutationen kann verschiedene Entzündungskrankheiten hervorrufen. NOD2, auch als CARD15 bekannt, erkennt beispielsweise schädliche Darmbakterien. Veränderte Formen des Rezeptors erhöhen das Risiko für die chronische Darmentzündung Morbus Crohn (http://www.ngfn.de).

Mario Albrecht, Altenstadt a. d. Waldnaab

Briefe an die Redaktion …

… richten Sie bitte mit Ihrer vollständigen Adresse an:

Spektrum der Wissenschaft
Ursula Wessels
Postfach 104840
D-69038 Heidelberg

E-Mail: wessels@spektrum.com

Anmerkung des Autors Luke A. J. O'Neill

Toll-artige Rezeptoren (TLRs) sind in der Tat nicht die einzigen wichtigen Proteine für die angeborene Immunität. Andere Rezeptoren wurden aber bewusst ausgespart – aus Platzgründen und wegen der übersichtlicheren Darstellung. Außerdem ist die Fachliteratur zu TLRs bereits umfangreicher und die Entwicklung von gezielt ansetzenden Pharmaka weiter gediehen.

Geld ohne Bedarf und Bedarf ohne Geld

Buchrezension »Grenzen des Wachstums im Widerstreit der Meinungen«, September 2005

Sicher liegt in der Ökonomie der Schlüssel der Wachstumsproblematik. Festzustellen ist weltweit ein krasses Verteilungsungleichgewicht. Dies hat sich in den letzten 30 Jahren weiter verschärft. Man kann daher nicht das Wachstum der Weltwirtschaft mit dem Wachstum der Bedürfnisse der Menschheit begründen – dieser Bedarf ist heute angesichts der Möglichkeiten noch weniger gedeckt als vor 30 Jahren. Es gibt abstrus viel »Geld ohne Bedarf« bei gleichzeitig skandalös viel »Bedarf ohne Geld«. Für naturwissenschaftlich Vorgebildete ist das Verständnis exponentieller Wachstumsvorgänge selbstverständlich. Nun liegt genau dieses Verhalten vor, wenn (Geld-)Guthaben permanent mit einer positiven (positiv = echt von Null verschieden, nicht gegen Null fallend) (Mindest-)Rate anwachsen. Der große britische Ökonom J. M. Keynes hat dargelegt, dass Guthaben und Schulden im Gleichschritt wachsen (müssen). Die Änderung der Geldsystematik ist daher unabdingbar (vgl. zum Beispiel http://www.geldre-

form.de), damit die Hoffnung des Buchautors, die »globale Bedrängnis« möge gar nicht erst entstehen, eine Realisierungschance hat.

Alwine Schreiber-Martens, Köln

Universum mitsamt Evolution von Gott geschaffen?

»Intelligent Design – Wo bleibt die Wissenschaft?«, Essay, Oktober 2005

Es gibt in der Natur keinen rational zwingenden Beweis für einen »intelligenten Designer«, und die Theorie des Intelligent Design genügt auch als Hypothese nicht den wissenschaftlichen Ansprüchen – insofern stimme ich dem Autor zu. Es ist jedoch nicht unvernünftig anzunehmen, dass die Realität, in der wir leben, mehr umfasst als das, was die Wissenschaften – einschließlich ihrer anerkannten Hypothesen – beschreiben.

So kann ich für möglich halten, dass ein Schöpfergott das Universum mitsamt der darin abgelaufenen Evolution erschaffen hat, ohne mein naturwissenschaftliches Weltbild als gelernter Physiker verraten zu müssen. Die Wirklichkeit dieses Gottes könnte Dimensionen jenseits unserer Raumzeit umfassen. So über der Zeit stehend hätte er die gesamte Entwicklung des Kosmos bei seiner Erschaffung schon »vor sich gesehen«.

In einem sehr weiten Sinne könnte man auch dies ein »Intelligent Design« nennen, aber das ist Glaubenssache, gehört in den Religionsunterricht und nicht in den Lehrplan für Biologie.

Dr. Hermann Henssen, Overath

Sind Mini-Schwarze-Löcher gefährlich?

»Schwarze Löcher im Labor«, September 2005

Mit diesem Beitrag wird ein wichtiger Aspekt angeschnitten, der bislang viel zu wenig Beachtung in der Öffentlichkeit fand: die Möglichkeit der gezielten, experimentellen Erzeugung Schwarzer Löcher mit einem Teilchenbeschleuniger.

Wie man ansatzweise aus dem Artikel entnehmen kann, ist die Physik des Schwarzen Lochs alles andere als wohl verstanden, schon deshalb nicht, weil es keine experimentellen Überprüfungen der Theorie gibt. Das, so die Hoffnung der Autoren, könnte sich aber sehr schnell ändern.

Doch der Gegenstand der Untersuchung wirft unmittelbar weitere Fragen auf: Wäre es nicht klüger und für die Allgemeinheit sicherer, wenn zunächst einmal die Suche nach und die Forschungen an diesen Objekten im Weltraum intensiviert würde? Müssen nicht vorab auch die ethischen Fragen, die mit der Erzeugung Schwarzer Löcher einhergehen, geklärt sein? Kann man diese Fragen den Forschern selbst überlassen? Und dürfen, ob dieser Fragen, Beschleuniger wie der LHC überhaupt in Betrieb genommen werden?

Den Optimismus der Autoren kann ich nicht teilen und es beruhigt wenig, dass täglich Hunderte solcher Mini-Schwarzen-Löcher in der Hochatmosphäre entstehen sollen und offensichtlich uns immer noch der Himmel lacht.

Hermann Fenger-Vegeler, Bielefeld



JEAN-FRANÇOIS PODEVIN

▲ Mikroskopisch kleine Schwarze Löcher könnten möglicherweise mit künftigen Beschleunigern erzeugt werden.

Anmerkung der Redaktion

Solche Bedenken werden tatsächlich diskutiert, zum Beispiel in dem ersten Weblink zum Artikel http://www.mpe.mpg.de/~amueller/.

Eine Gefährdung durch künstlich erzeugte Minilöcher gilt aber demnach als ausgeschlossen, weil diese winzigen Objekte, sofern sie überhaupt erzeugt werden können, sofort zerfallen würden.

Spektrum DER WISSENSCHAFT

Chefredakteur: Dr. habil. Reinhard Breuer (v.i.S.d.P.)
Stellvertretende Chefredakteure: Dr. Inge Hoefer (Sonderhefte), Dr. Gerhard Trageser
Redaktion: Dr. Klaus-Dieter Linsmeier, Dr. Christoph Pöppe (Online Coordinator), Dr. Uwe Reichert, Dr. Adelheid Stahnke; E-Mail: redaktion@spektrum.com
Ständiger Mitarbeiter: Dr. Michael Springer
Schlussredaktion: Christina Peiberg (kom. Ltg.), Sigrid Spies, Katharina Werle
Bildredaktion: Alice Krüßmann (Ltg.), Anke Lingg, Gabriela Rabe
Art Direction: Karsten Kramarczik
Layout: Sibylle Franz, Oliver Gabriel, Marc Grove, Anke Heinzelmann, Claus Schäfer, Natalie Schäfer
Redaktionsassistenz: Eva Kahlmann, Ursula Wessels
Redaktionsanschrift: Postfach 10 48 40, D-69038 Heidelberg, Tel. 06221 9126-711, Fax 06221 9126-729
Verlag: Spektrum der Wissenschaft Verlagsgesellschaft mbH, Postfach 10 48 40, D-69038 Heidelberg; Hausanschrift: Slevogtstraße 3–5, D-69126 Heidelberg, Tel. 06221 9126-600, Fax 06221 9126-751; Amtsgericht Heidelberg, HRB 8114
Verlagsleiter: Dr. Carsten Könneker
Geschäftsleitung: Markus Bossle, Thomas Bleck
Herstellung: Natalie Schäfer, Tel. 06221 9126-733
Marketing: Annette Baumbusch (Ltg.), Tel. 06221 9126-741, E-Mail: marketing@spektrum.com
Einzelverkauf: Anke Walter (Ltg.), Tel. 06221 9126-744
Übersetzer: An diesem Heft wirkten mit: Dr. Frank Erdnüß, Dr. Markus Fischer, Doris Gerstner, Dr. Gabriele Herbst, Antje Kahlheber.

Leser- und Bestellservice: Tel. 06221 9126-743, E-Mail: marketing@spektrum.com
Vertrieb und Abonnementverwaltung: Spektrum der Wissenschaft Verlagsgesellschaft mbH, c/o Zenit Pressevertrieb GmbH, Julius-Hölder-Str. 47, D-70597 Stuttgart-Degerloch, Vertretungsberechtigter: Uwe Bronn
Bezugspreise: Einzelheft € 6,90/sFr 13,50; im Abonnement € 75,60 für 12 Hefte; für Studenten (gegen Studiennachweis) € 65,40. Die Preise beinhalten € 6,00 Versandkosten. Bei Versand ins Ausland fallen € 6,00 Portomehrkosten an. Zahlung sofort nach Rechungserhalt.
Konto: Postbank Stuttgart 22 706 708 (BLZ 600 100 70)
Anzeigen: GWP media-marketing, Verlagsgruppe Handelsblatt GmbH; Bereichsleitung Anzeigen: Harald Wahls; Anzeigenleitung: Hartmut Brendt, Tel. 0211 6188-145, Fax 0211 6188-400; verantwortlich für Anzeigen: Gerlinde Volk, Postfach 102663, D-40017 Düsseldorf, Tel. 0211 887-2387, Fax 0211 887-2686
Anzeigenvertretung: Berlin: Michael Seidel, Friedrichstraße 150, D-10117 Berlin, Tel. 030 61686-144, Fax 030 6159005; Hamburg: Siegfried Sippel, Burchardstraße 17/I, D-20095 Hamburg, Tel. 040 30183-163, Fax 040 30183-283; Düsseldorf: fs//partner, Stefan Schließmann, Friedrich Sültemeier, Bastionstraße 6a, D-40213 Düsseldorf, Tel. 0211 862997-0, Fax 0211 132410; Frankfurt: Klaus-Dieter Mehnert, Eschersheimer Landstraße 50, D-60322 Frankfurt am Main, Tel. 069 242445-38, Fax 069 242445-55; Stuttgart: Dieter Drichel, Werastraße 23, D-70182 Stuttgart, Tel. 0711 22475-24, Fax 0711 22475-49; München: Karl-Heinz Pfund, Josephspitalstraße 15/IV, D-80331 München, Tel. 089 545907-30, Fax 089 545907-24
Druckunterlagen an: GWP-Anzeigen, Vermerk: Spektrum der Wissenschaft, Kasernenstraße 67, D-40213 Düsseldorf, Tel. 0211 887-2387, Fax 0211 887-2686
Anzeigenpreise: Gültig ist die Preisliste Nr. 26 vom 01.01.2005.
Gesamtherstellung: Konradin Druck GmbH, Leinfelden-Echterdingen

ISSN 0170-2971

SCIENTIFIC AMERICAN
415 Madison Avenue, New York, NY 10017-1111
Editor in Chief: John Rennie, Publisher: Bruce Brandfon, Associate Publishers: William Sherman (Production), Lorraine Leib Terlecki (Circulation), Chairman: John Sargent, President and Chief Executive Officer: Gretchen G. Teichgraeber, Vice President: Frances Newburg, Vice President/Managing Director, International: Dean Sanderson



▼ Mit vier Beinen auf der einen und zwei auf der anderen Seite des Abgrunds hangelt sich die Taufliege über den Spalt.

SIMON PICK UND ROLAND STRAUSS

ROBOTIK

Kletternde Fliegen

Das Lieblingstier der Entwicklungsbiologen und Genetiker soll nun auch als Vorbild für Laufroboter herhalten: die Taufliege *Drosophila melanogaster*. Wie Simon Pick und Roland Strauss von der Universität Würzburg feststellten, kann das winzige Insekt mit seinen sechs Beinen nämlich hervorragend klettern. Wurde das Tier durch Stutzen der Flügel am Fliegen gehindert, überwand es zum Beispiel eine Spalte, die doppelt so breit war, wie es selbst lang ist. Dabei schätzte es vorher visuell die Entfernung ab. War sie zu groß, machte das Insekt einfach kehrt. Ansonsten betastete es mit den Vorderbeinen den Abgrund, umklammerte dessen Rand und schob sich so weit wie möglich vor. Dann streckte es den Körper in horizontaler Richtung und versuchte mit den Vorderbeinen die gegenüberliegende Kante zu erreichen. Im Erfolgsfall hangelte es sich schließlich auf die andere Seite.

Durch Beobachtung von Mutanten, die jeweils bei einzelnen Teilschritten versagten, identifizierten die Forscher unabhängige sensorische und motorische Module, deren Zusammenspiel für die Bewältigung der Aufgabe nötig ist. Diese wollen sie nun auf Roboter übertragen.

Current Biology, Bd. 15, S. 1473

ASTROPHYSIK

Gammablitz vom Rand des Universums

Der Nasa-Satellit »Swift« hat jetzt die bisher fernste Explosion im All entdeckt. Sie erzeugte einst einen gigantischen Blitz aus hochenergetischer Gammastrahlung, der die unvorstellbare Strecke von 13 Milliarden Lichtjahren zurücklegte, bevor er am 4. September die Erde erreichte und hundert Sekunden lang am Himmel aufleuchtete. Die Explosion ereignete sich somit zu einer Zeit, als das Universum erst 700 Millionen Jahre alt war.

Bis jetzt ist noch nicht ganz geklärt, wie Gammastrahlungsausbrüche entstehen. Wissenschaftler vermuten, dass die am 4. September registrierte Explosion auf den Tod eines extrem massereichen Sterns zurückgeht, der zu einem Schwarzen Loch kollabierte.

Von allen bekannten Himmelsobjekten ist nur ein Quasar noch weiter entfernt und damit älter als der jetzt beobachtete Ausbruch. Quasare gelten jedoch als gigantische Schwarze Löcher, welche die Masse mehrerer Milliarden Sonnen in sich vereinigen. Wie das Sterben eines einzelnen Sterns einen so starken Blitz auslösen kann, dass wir ihn heute noch wahrnehmen, ist deshalb rätselhaft. Entweder war dieses frühe stellare Objekt anders als die heute noch existierenden oder es gab seine Energie in einem scharf gebündelten Strahl ab, der zufällig die Erde streifte.

Pressemeldung der National Science Foundation vom 12.9.2005

H
He
C, O, N
Si
Mg, Ne
Fe

NSF / NICOLE RAGER FULLER

◀ Zeugt der jetzt beobachtete Gammastrahlenausbruch vom Kollaps eines extrem massereichen Sterns vor 13 Milliarden Jahren?

GENETIK

Auf dem Weg zum Superhirn?

Wir Menschen zeichnen uns vor allem durch unser einzigartiges Gehirn aus. Sein Volumen hat sich verdreifacht, seit sich unsere Vorfahren vor 7 bis 8 Millionen Jahren von der Schimpansenlinie abspalteten. Aber hörte seine Evolution mit dem Auftritt des *Homo sapiens sapiens* vor etwa 200 000 Jahren auf? Oder hat es sich seither weiterentwickelt und tut das womöglich immer noch?

Auf der Suche nach der Antwort analysierte ein Team um Bruce T. Lahn von der Universität Chicago zwei Gene, deren Ausfall jeweils ein zu kleines Gehirn verursacht: ASPM und Mikrozephalin. Beide haben sich, wie Vergleiche mit Schimpansen zeigten, im Lauf der Menschwerdung besonders schnell verändert, was auf das Wirken von Selektionsprozessen hindeutet – etwa alle 350 000 Jahre setzte sich eine Mutation innerhalb unserer Spezies durch.

Als die Wissenschaftler nun die beiden Gene in verschiedenen ethnischen Gruppen untersuchten, identifizierten sie bei Mikrozephalin eine Mutation, die vor nur 37 000 Jahren entstand und schon in zwei Drittel der Bevölkerung verbreitet ist. Die jüngste Variante bei ASPM kam sogar erst vor 5800 Jahren auf und findet sich bereits bei einem Drittel der Menschheit.

Auch diese Veränderungen müssen mit einem evolutionären Vorteil verbunden sein; sonst hätten sie sich nicht so schnell ausgebreitet. Worin dieser Vorteil bestehen könnte, lässt sich indes nicht sagen. Klar scheint nur, dass unser Gehirn mit seiner Evolution noch lange nicht am Ende ist.

Science, 9.9.2005, S. 1717 und 1720

MEDIZIN

Entzündungshemmendes Olivenöl

Italiener, Griechen und Spanier erkranken seltener an Herz-Kreislauf-Störungen und bestimmten Tumoren als Mitteleuropäer. Mediziner führen das auf die besondere Ernährungsweise unserer südlichen Nachbarn zurück. Doch was im Einzelnen die mediterrane Küche gesund macht, ist noch unklar. Olivenöl gilt als Hauptkandidat – wegen seines hohen Anteils an ungesättigten Fettsäuren. Doch möglicherweise ist es das nicht allein. Forscher an der Universität von Pennsylvania haben nun einen weiteren Inhaltsstoff entdeckt, der Erkrankungen vorbeugt.

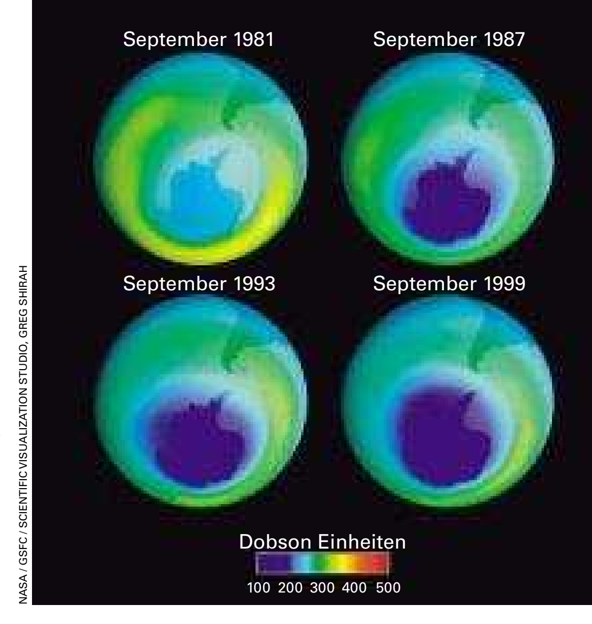
Auf die Spur der Substanz kam Gary Beauchamp, als er bei einer Tagung auf Sizilien einen Schluck frisch gepresstes Olivenöl probierte und feststellte, dass es ähnlich in seiner Kehle stach wie das Medikament Ibuprofen. Bei der anschließenden Suche nach dem Stoff, der den bitteren Geschmack hervorruft, stießen er und seine Kollegen auf eine Verbindung, die sie Oleacanthal nannten. Sie bindet sich, wie Enzymtests ergaben, an die gleichen Zielmoleküle in der Zelle wie Ibuprofen oder Aspirin – zwei Wirkstoffe, die zu den nichtsteroidalen Entzündungshemmern zählen und unter anderem zur Vorbeugung gegen Herz-Kreislauf-Erkrankungen dienen. Drei Esslöffel Olivenöl entsprechen etwa einem Zehntel einer therapeutischen Dosis von Ibuprofen.

Nature, 1.9.2005, S. 45

▼ Olivenöl enthält eine entzündungshemmende Substanz, die ähnlich wirkt wie das Medikament Ibuprofen.



JON PERLMUTTER



NASA / GSFC / SCIENTIFIC VISUALIZATION STUDIO, GREG SHIRAH

▲ Das Ozonloch über der Antarktis scheint seit zehn Jahren nicht mehr zu wachsen.

UMWELT

Ozonschicht atmet auf

Internationale Vereinbarungen zum Klimaschutz zeigen Wirkung. Dieses Fazit ziehen Forscher mehrerer US-Universitäten und der National Oceanic and Atmospheric Administration der USA aus einer Analyse umfangreicher Daten über die stratosphärische Ozonschicht. Deren Zerstörung ist demnach seit 1996 nicht weiter vorangeschritten. Als Grundlage der Analyse dienten monatliche Durchschnittswerte des Ozongehalts der Atmosphäre von 1978 bis 2002, die an weltweit verteilten Messstationen gewonnen wurden.

Die Forscher führen die Trendumkehr auf das weit gehende Verbot halogenierter Kohlenwasserstoffe zurück, die als Hauptverursacher des Ozonverlusts gelten. Im völkerrechtlich verbindlichen Montreal-Protokoll von 1987 haben sich die meisten Staaten dazu verpflichtet, Produktion und Verbrauch dieser Substanzen drastisch einzuschränken.

Grund zur Entwarnung besteht dennoch nicht. Auch wenn die Ozonschicht nicht weiter schwindet, kann es noch Jahrzehnte dauern, bis sie sich wieder erholt hat. So ist das Ozonloch über der Antarktis, das mit der jährlichen Wiederkehr der Sonne am Südpol auftritt, in diesem Jahr wieder besonders groß. Nur 2000 und 2003 war es noch ausgeprägter.

Journal of Geophysical Research, Bd. 110, D16306



BRAD GRAVINA

In dieser Höhle wohnten abwechselnd Neandertaler und Jetztmenschen.

ARCHÄOLOGIE

Eiszeitliches Höhlensharing

Gab es Kontakte zwischen Neandertalern und modernen Menschen? Diese Frage ist noch immer umstritten. Jetzt haben Forscher der Universitäten Cambridge und Oxford einen Fall genauer untersucht, in dem beide Hominidenarten abwechselnd dieselbe Wohnung benutzten: die Grotte des Fées bei Châtelperron im französischen Zentralmassiv.

Bei der Ausgrabung der Höhle zwischen 1951 bis 1955 kartografierte Henri Delaporte fünf Besiedlungshorizonte. Vier davon enthielten Artefakte nach Art der Châtelperronien-Kultur, die den Neandertalern zugeordnet wird. In der zweituntersten Schicht fanden sich hingegen die effektiveren Werkzeuge der Aurignacien-Stufe, die Archäologen mit dem modernen Menschen in Verbindung bringen. Auch zwei Schmuckstücke aus Raubtierzähnen waren nach Art unserer Altvorderen bearbeitet.

Durch Radiokarbondatierung tierischer Knochensplitter aus den verschiedenen Horizonten konnten die britischen Forscher nun die genauen Besiedlungszeiten bestimmen. Die Proben der tiefsten Schicht erwiesen sich als 40 000 bis 38 000 Jahre alt. Der Horizont mit den Artefakten des modernen Menschen war 1000 bis 1500 Jahre jünger. Vor 36 000 Jahren bezogen dann erneut Neandertaler die Höhle.

Die Aurignacien-Phase fällt, wie Tiefseebohrkerne und Proben aus dem Grönlandeis belegen, mit einem Kälteeinbruch zusammen. Die Forscher vermuten, dass die Neandertaler damals in wärmere Gefilde abwanderten und ihre Wohnung unseren Vorfahren überließen, die mit der Kälte besser zurecht kamen.

Nature online, 31. 8. 2005, doi:10.1038/nature04006

MATERIALFORSCHUNG

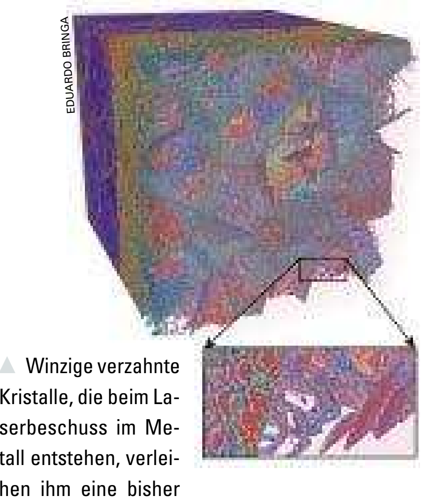
Laserhammer für Hephaistos

Metalle bestehen aus kleinen kristallinen Körnern. Diese verkeilen sich mit ihren rauen Oberflächen ineinander und sorgen so für die Festigkeit des Materials. Beim Hämmern zerkleinert der Schmied die Körner, was deren wechselseitige Reibung und damit die Härte steigert. Werden die Kristalle allerdings zu klein, kommt es zum gegenteiligen Effekt. Bei Durchmessern unter hundert Nanometern glätten sich die Oberflächen: Die Körner rutschen aneinander ab und das Metall wird wieder weicher.

Am Lawrence Livermore National Laboratory ersetzten Eduardo Bringa und seine Mitarbeiter nun den Hammer durch einen Laserstrahl. Indem sie damit eine Kupferplatte beschossen, erzeugten sie eine Stoßwelle, welche die Arbeit des Schmieds verrichtete – nur viel besser. Während die Wellenfront mit mehrfacher Schallgeschwindigkeit das Werkstück durchquerte, zertrümmerte sie die Körner. Dabei entstanden nanokleine Partikel, deren Oberfläche jedoch – anders als beim Schmieden – gezackt und uneben blieb. Mit jedem Schuss stieg so die Härte um bis zu zwanzig Prozent.

Die Schmiede müssen allerdings noch warten: Vorerst gelingt die Laserhärtung nur bei Proben mit weniger als einem Kubikmillimeter Volumen.

Science, 16. 9. 2005, S. 1838



EDUARDO BRINGA

Winzige verzahnte Kristalle, die beim Laserbeschuss im Metall entstehen, verleihen ihm eine bisher unerreichte Härte.

PHYSIK

Eis bei Zimmertemperatur

Bei plus zwanzig Grad Schlittschuh laufen auf einem geforenen See? Zumindest theoretisch ist das möglich. Das Eis muss nur von einem ausreichend hohen elektischen Feld umgeben sein. Nach bisherigen Berechnungen sollte die Feldstärke allerdings mindestens eine Milliarde Volt pro Meter betragen, um die thermische Energie von lauwarmem Wasser zu überwinden, sodass es gefriert. Zum Vergleich: Ein Blitz entsteht schon bei einem Hundertstel dieses Werts.

Forscher um Eun-Mi Choi und Heon Kang von der Nationaluniversität Seoul (Korea) haben nun jedoch festgestellt, dass ein sehr viel schwächeres Feld genügt. Eigentlich wollten sie herausfinden, wie Elektronen durch einen dünnen Wasserfilm zu einer Elektrode wandern. Dazu träufelten sie einen Wassertropfen auf eine Goldplatte und näherten sich ihm mit der elektrisch geladenen Spitze eines Rastertunnelmikroskops. Doch bevor sie die Flüssigkeit erreichten – bei einem Abstand von wenigen zehntel Nanometern – erstarrte das Wasser.

Die angelegte Spannung beträgt zwar nur einige hundertstel Volt. Dennoch herrscht an der extrem dünnen Spitze ein sehr hohes elektrisches Feld. Allerdings erreicht es trotz einer Stärke von mehreren Millionen Volt pro Meter – nur ein Tausendstel des Werts, bei dem das Wasser laut Theorie gefrieren sollte.

Physical Review Letters, Bd. 95, Nr. 085701



RICKARD OLSSON / WWW.FREENATUREPICTURES.COM

Solches Eis kann auch bei Zimmertemperatur entstehen – aber nur in einem sehr starken elektrischen Feld.

Mitarbeit: A. Schneider, S. Keilmann und S. Hügler

Aus urheberrechtlichen Gründen können wir Ihnen die Bilder leider nicht online zeigen.

Bunte Eismeeresfrüchte

Die Wassertemperatur liegt nur wenige Grad über dem Gefrierpunkt, der Druck ist höllisch und es herrscht ewige Finsternis. Dennoch wimmeln die Tiefen des Nordpolarmeers von farbenprächtigen Lebewesen. Das entdeckten Forscher um Rolf Gradinger von der Universität von Alaska in Anchorage, als sie kürzlich mit Tauchrobotern das bis zu 5000 Meter tiefe kanadische Becken erkundeten. Dabei stießen sie unter der Eisdecke auch auf bisher unbekannte Arten wie die abgebildete durchsichtige, wurmförmige Seegurke sowie eine leuchtend rote Qualle der Gattung *Crossota* (rechts unten). Daneben fanden sie ungewöhnlich große Mengen an Dorschen, Tintenfischen und Hinterkiemerschnecken der Art *Clione limacina* (rechts oben), die Bartenwalen als Nahrung dienen. Die Idylle scheint allerdings bedroht, wenn im Zuge der globalen Erwärmung das Polareis schmilzt.

ASTROPHYSIK

Der Kosmos im Computer

Mit der »Millennium-Simulation« ist es gelungen, in nie gekannten Details nachzuzeichnen, wie sich die großräumigen Strukturen des Weltalls gebildet haben.

Von Markus Pössel

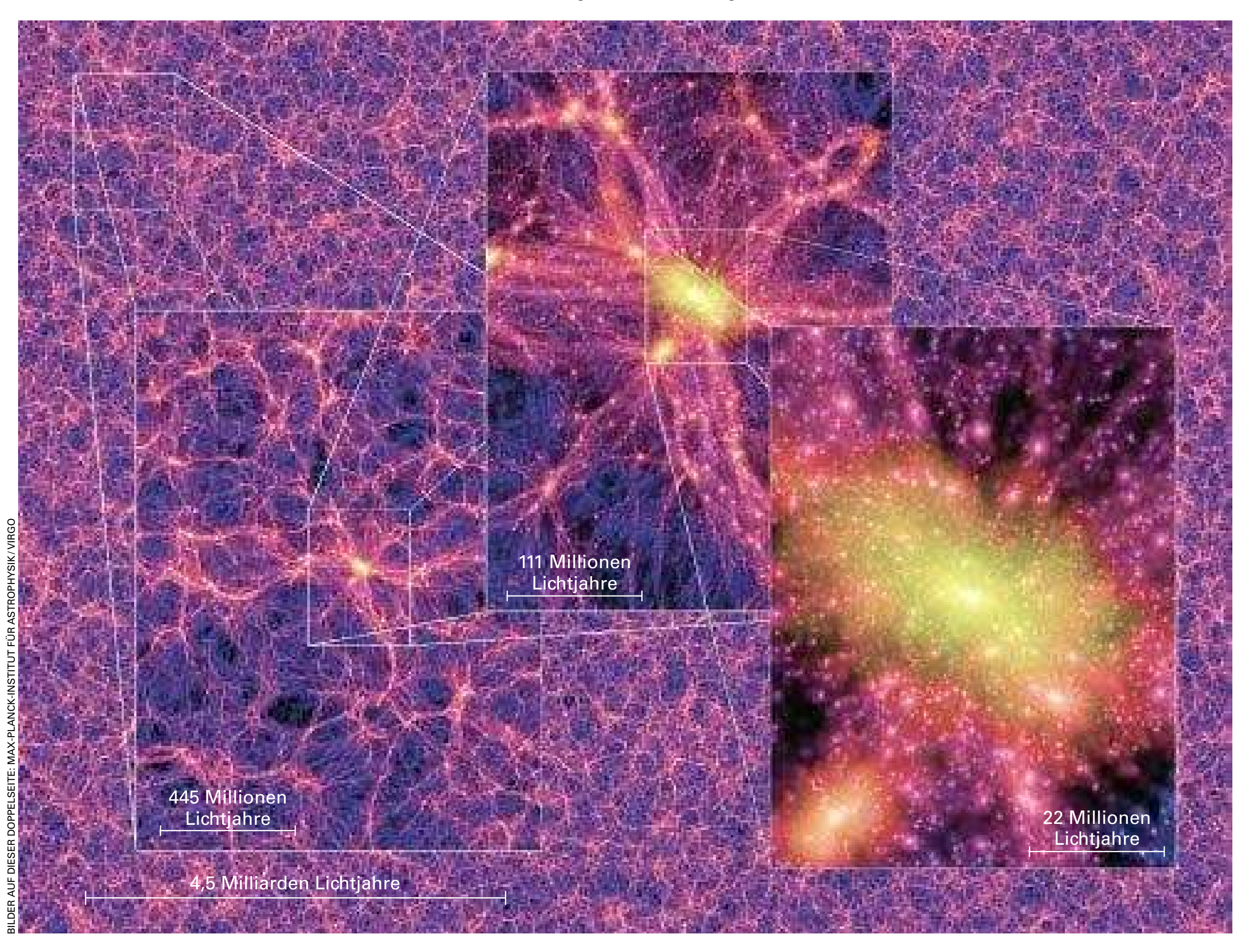
Nach dem Urknall vor etwa 14 Milliarden Jahren bestand der Kosmos zunächst nur aus einer strukturlosen Ursuppe ultraheißer Elementarteilchen. Wie wurde daraus das Universum, das uns die heutigen Teleskope zeigen – eine Welt mit Sternen, Galaxien und Galaxienhaufen? Das ist eine der zentralen Fragen der modernen Kosmologie.

Eine wichtige Rolle bei der Suche nach einer stimmigen Antwort spielen Computersimulationen. Mit ihnen lässt sich verfolgen, wie sich winzige Dichteschwankungen im frühen Universum allmählich verstärkten, sodass sich die Materie immer mehr zusammenballte, bis schließlich der heutige Kosmos mit seiner großräumig verklumpten Struktur entstand. Das Virgo-Konsortium, eine Gruppe von Kosmologen aus Deutschland, England, Kanada, Japan und den USA unter Leitung des Max-Planck-Instituts für Astrophysik in Garching, hat diese Berechnungen mit der »Millennium-Simulation« jetzt zu einem vorläufigen Höhepunkt gebracht – und dabei einige offene kosmologische Fragen beantwortet.

Hauptzutat des Rezepts für ein Universum im Computer ist überraschenderweise keineswegs die herkömmliche Materie aus Atomen. Diese bildet, wie Astronomen seit einiger Zeit wissen, gleichsam nur die Spitze des kosmischen Eisbergs. Indirekte Beobachtungen – von den Sternbewegungen in Galaxien bis hin zur Häufigkeit der leichten chemischen Elemente im Weltall – machen klar: Rund achtzig Prozent der Masse von Galaxien und Galaxienhaufen liegen in Form von Materie vor, die weder Licht noch sonstige elektromagnetische Strahlung absorbiert oder aussendet. Nur über die Schwerkraft verrät sie ihre Gegenwart.

Bislang ist ungeklärt, wie sich diese »dunkle« Materie in die Modelle der Teilchenphysik einordnet. Einige ihrer wichtigsten Eigenschaften ließen sich aus as-

Nachdem die Millennium-Simulation die Entwicklung unserer Welt seit dem Urknall reproduziert hatte, war im Computer ein Universum entstanden, das in seiner großräumigen Struktur ausgezeichnet mit dem realen Kosmos übereinstimmt. Gezeigt ist ein Zoom in eine modellierte Raumregion, der die großen Inhomogenitäten deutlich macht.



BILDER AUF DIESER DOPPELSEITE: MAX-PLANCK-INSTITUT FÜR ASTROPHYSIK / VIRGO

tronomischen Beobachtungen und Computersimulationen immerhin ableiten. So verhält sich die rätselhafte Materieform, als bestehe sie aus relativ massereichen Elementarteilchen, die sich sehr viel langsamer als das Licht bewegen. Außerdem bildete sie schon in der Kinderzeit des Weltalls erste Verdichtungen: Während die elektromagnetische Strahlung, die den extrem heißen frühen Kosmos durchsetzte, jegliche Ansammlungen normaler Teilchen sofort auseinander trieb, konnte sie die Dunkle Materie nicht daran hindern, unter dem Einfluss ihrer wechselseitigen Schwerkraft zu verklumpen. In allen Modellierungen der Strukturbildung im Universum spielt diese Materieform deshalb die Hauptrolle.

Die Entwicklung des gesamten Weltalls rechnerisch nachzuvollziehen ist selbst mit den leistungsfähigsten Supercomputern nicht möglich. Auch die Millennium-Simulation beschränkte sich deshalb auf einen Ausschnitt, der allerdings groß genug war, um repräsentative Ergebnisse für das gesamte Universum zu liefern. Die Menge an Dunkler Materie darin betrug 10 Trillionen Sonnenmassen. Sie wurde rein formal auf so viele »Teilchen« verteilt, wie der Computer von seiner Rechenkapazität her verkraftete. Das waren mehr als 10 Milliarden – rund zehnmal so viele wie bei vorangegangenen Modellierungen. Jedes dieser Pseudoteilchen repräsentierte somit die Masse von etwa einer Milliarde Sonnen.

Verdichtungen Dunkler Materie

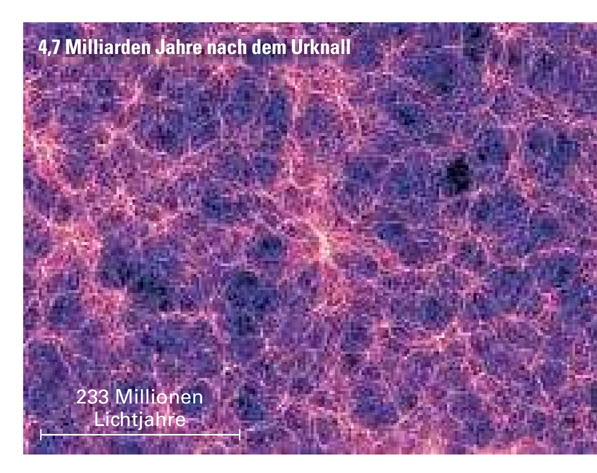
All diese Partikel waren im Computermodell zunächst fast gleichmäßig in einem Würfel mit einer Kantenlänge von rund 20 Millionen Lichtjahren verteilt. Allerdings gab es winzige, zufällig erzeugte Unregelmäßigkeiten: Einige Regionen enthielten etwas mehr Dunkle Materie, andere weniger. Diese Abweichungen von der Gleichverteilung entsprachen dem, was wir über die Dichteschwankungen im frühen Universum wissen – zum einen aus den Vorhersagen des so genannten Inflationsmodells und zum anderen aus astronomischen Beobachtungen.

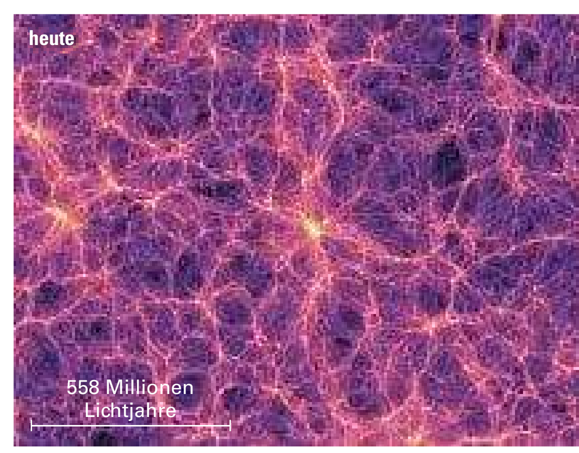
Die so genannte kosmische Hintergrundstrahlung bietet nämlich direkten Einblick in den Zustand des Universums nur rund 400 000 Jahre nach dem Urknall. Ihre extrem genaue Vermessung mit dem US-Satelliten Wilkinson Microwave Anisotropy Probe (WMAP) ergab jüngst direkte Hinweise auf Umfang und

Für einen Ausschnitt aus dem expandierenden Universum führte die Millennium-Simulation vor, wie die Materie seit dem Urknall immer mehr verklumpte. Hier sind vier »Schnappschüsse« zu verschiedenen Zeiten wiedergegeben.









Eigenschaften winziger Dichteschwankungen im damaligen, überaus gleichförmigen Weltall. Deren Weiterentwicklung bis etwa 10 Millionen Jahre nach dem Urknall lässt sich mit einfachen Rechenmethoden bestimmen. Zu diesem Zeitpunkt setzte die Millennium-Simulation ein.

Dabei verfolgte der Computer Schritt für Schritt die Bewegung aller zehn Milliarden Partikel. Die Schrittlänge variierte je nachdem, wie viel gerade mit dem betreffenden Masseteilchen passierte, betrug im Durchschnitt aber etwa eine Million Jahre. Wie das reale Weltall dehnte sich auch das rechnerische Gegenstück gemäß dem Urknallmodell und den astronomischen Beobachtungen aus.

Doch das geschah nicht völlig gleichmäßig: Innerhalb des expandierenden Universums machten sich mit der Zeit lokale Schwerkrafteinflüsse bemerkbar. Regionen, die ein wenig mehr Masse enthielten, übten eine etwas größere Anziehung auf die umliegenden Teilchen aus als materieärmere Bereiche. Deshalb tendierten sie dazu, sich weiter zu verdichten: Das Universum verklumpte.

Die Simulation ahmte diesen Vorgang nach, indem sie für jedes der 10 Milliarden Teilchen aus Dunkler Materie verfolgte, wie es sich unter dem Gravitationseinfluss aller anderen bewegte. Nach insgesamt über 11 000 Zeitschritten – was knapp 14 Milliarden Jahren entsprach – war der heutige Zustand des Weltalls erreicht (Bild links). Bis dahin hatten sich aus den anfangs etwas dichteren Regionen galaxiengroße Materieansammlungen und Galaxienhaufen gebildet. Insgesamt war die filigrane, dreidimensionale Netzstruktur entstanden, die auch das wirkliche Weltall auf gewaltigen Größenskalen von einigen hundert Millionen Lichtjahren besitzt. Zugleich hatte sich der Anfangswürfel auf über zwei Milliarden Lichtjahre Seitenlänge aufgebläht.

Der Rechenaufwand, der vom fast homogenen Anfangsuniversum zur Jetztzeit führte, war gigantisch. Ein moderner PC mit nur einem Prozessor hätte für diese Simulation fast vierzig Jahre be- ▷

GLOSSE

Aufopferungsvolle Herzensbrecher

Computer offenbart segensreiches Wirken von Frauenhelden.

»Ich bin ein Don Juan, kein Don Giovanni«, sagte einmal ein Mann zu mir, als er mir von seinem wechselhaften Liebesleben berichtete. Wie der Titelheld von Lord Byrons Versepos könne er halt nichts für seine Anziehungskraft auf Frauen. Keinesfalls sei er ein kaltblütiges Wesen ohne Moral und Verantwortung wie Mozarts Opernfigur. »Ob blond, ob schwarz, ob braun – ich liebe alle Frau'n«, lautete sein Motto. Die Vertreterinnen des weiblichen Geschlechts kamen und gingen, so manche ließ er zurück mit gebrochenem Herzen. Die eine oder andere, so stellte sich heraus, hatte seinetwegen sogar ihren langjährigen Partner verlassen.

Einige der Opfer hätten diesem selbstverliebten Verführer sein Don-Juan-tum wohl gern ausgetrieben. Wie wäre es mit der medizinischen Methode? Spektrum-Leser wissen: Die Casanovas unter den Präriewühlmäusen mutieren zu braven und vor allem treuen Familienvätern, wenn sie die Botenstoffe Vasopressin und Oxytocin, die als Stillhormone bekannt sind, verabreicht bekommen. Sollte das bei flatterhaften Frauenhelden nicht auch funktionieren? Eine neuartige Pille für den Mann sozusagen?

Doch halt, meine Damen, Sie würden sich nur ins eigene Fleisch schneiden! Denn wie Richard Ecob von der Universität Oxford jetzt herausgefunden hat, erfüllen die Herzensbrecher einen wichtigen evolutionären Zweck. In Wahrheit leisten diese »Super-Dater« den verlassenen Frauen einen großen Dienst – sprengen sie doch alte, verkrustete und ohnehin nicht taugliche Beziehungen und helfen den so Befreiten, endlich einen Partner zu finden, der zu ihnen passt. Dabei handeln die vermeintlichen Egomanen keineswegs zum eigenen Vorteil. Während ihre Flirtopfer nach dem erotischen Zwischenstopp meist in den Hafen einer harmonischen Beziehung einlaufen, tun sich die Casanovas eher schwer, eine langfristige Partnerin zu finden. Frau könnte die Ärmsten fast bemitleiden!

Und wie gelang es, all diese bedeutenden Erkenntnisse zu gewinnen? Streng wissenschaftlich natürlich – mit Hilfe eines Computerprogramms. Ecob ist Physiker und wie viele seiner Zunft der Überzeugung, alles auf der Welt sei letztlich Physik (nun ja, die Liebe ist bekanntlich Chemie, aber die ist eben im Grunde auch nichts anderes als Physik). Im Bereich der zwischenmenschlichen Beziehungen, so erkannte der Forscher messerscharf, verhielten sich die Angehörigen unserer postmodernen Gesellschaft letztlich nicht anders als radioaktive Atome. Ein zweimal getrennter Single und ein Atomkern, der zwei Zerfälle hinter sich hat, seien wahrscheinlichkeitstheoretisch Jacke wie Hose. »Als wir es grafisch darstellten, waren die Kurven sehr ähnlich«, meinte Ecob gegenüber der BBC. Und so schrieb er ein Computerprogramm, das ein soziales Netzwerk nachbildete. Darin tummelten sich die »Software Singles« wie kleine Legomännchen – mobil und vielseitig einsetzbar.

Wir Leser einer naturwissenschaftlichen Zeitschrift sind beeindruckt: Wie leicht sich doch die Untiefen der menschlichen Seele analysieren und ausloten lassen! Ein kleines, handgestricktes Prográmmchen genügt. Was Kunst und Literatur seit Jahrhunderten nicht geschafft haben – das unerschöpfliche Thema der Liebe in allen Nuancen zu beleuchten – erledigt ein Physiker im Handumdrehen. Im Rechner kreiert er sein virtuelles Sozialgefüge, in dem er die Menschen wie Schachfiguren hin und her schiebt, aus ihnen wahlweise Herzensbrecher oder brave Familienväter machen kann. Und – schwups! – sind auch die Don-Juan-Opfer getröstet – wissen sie doch, dass ihr momentanes Ungemach ihnen letztlich den ersehnten Märchenprinzen bescheren wird. Ach, wie schön ist doch die Wissenschaft!

Stephanie Hügler

Die Autorin arbeitet als freie Journalistin in Heidelberg.

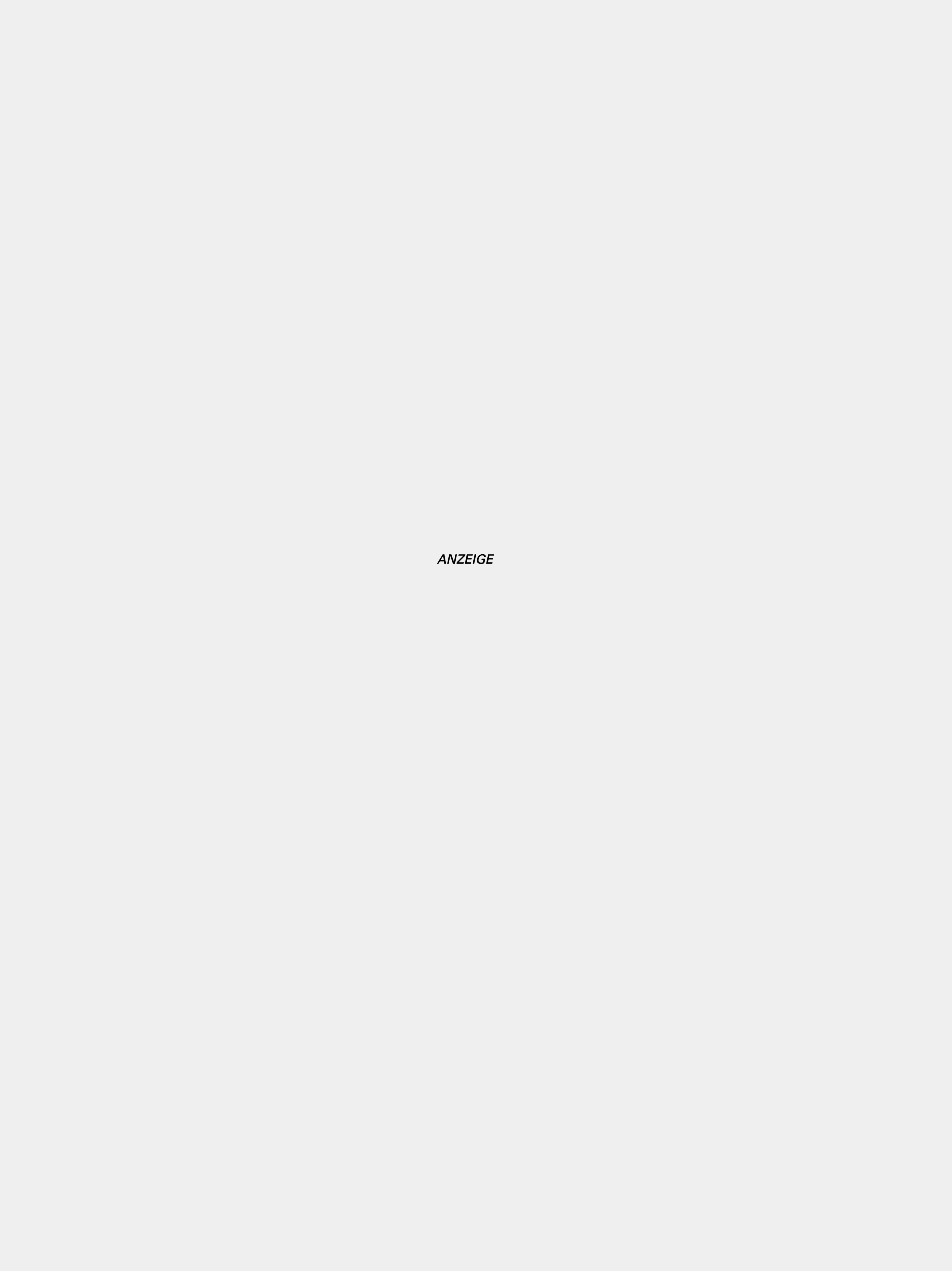
▷ nötigt. Mit den 512 Prozessoren eines Parallelrechners am Rechenzentrum der Max-Planck-Gesellschaft in München, den die Virgo-Gruppe nutzte, schrumpfte der Zeitaufwand auf rund 28 Tage.

In dieser ersten Phase der Simulation wurde nur die Dunkle Materie berücksichtigt. All die Teilchen, aus denen unsere Alltagswelt aufgebaut ist, blieben somit ausgeblendet. Das mag paradox erscheinen, ist aber eine zulässige Näherung. Die wohlbekannte, leuchtende Materie trug nämlich kaum etwas zur Entstehung der großräumigen Strukturen unseres Universums bei. Dazu war ihre Gesamtmasse viel zu gering. Letztlich folgte sie einfach dem Schwerefeld, das die Dunkle Materie vorgab: Deren Verdichtungen bestimmten, wo genügend herkömmliche Masse zusammenkam, um die ersten »Sonnen« aufflammen zu lassen, oder wo sich Abermilliarden von Sternen in Galaxien zusammenballten und wo gewaltige Materiemengen zu den ersten superschweren Schwarzen Löchern kollabierten – die mit ihrer immensen Gravitation nichts, was einmal hineingeraten ist, jemals wieder entkommen lassen.

Das finstere All leuchtet auf

Diese »Huckepack-Evolution« der leuchtenden Materie, vornehmlich Wasserstoff und Helium, wurde in der zweiten Phase der Millennium-Simulation nachvollzogen – unter Berücksichtung all dessen, was die heutige Physik über die Entstehung von Sternen, Galaxien und Schwarzen Löchern weiß. Mit einer Reihe entsprechender Modelle berechnete der Computer, wie sich im Rahmen der zuvor ermittelten Verklumpungsgeschichte die herkömmliche Materie entwickeln würde. Dies brachte das zunächst noch finstere simulierte Universum zum Leuchten: Sterne erstrahlten, an Dichteknoten der Dunklen Materie entfalteten die ersten Galaxien ihre Spiralarme, Supernovae explodierten und Quasare (Kerne aktiver Galaxien) verschleuderten gigantische Energiemengen.

Danach begann der Vergleich mit den Beobachtungsdaten. Umfassende Himmelsdurchmusterungen wie der *Sloan Digital Sky Survey* (SDSS) oder der 2-Grad-Feld-Galaxien-Rotverschiebungs-Survey (2dFGRS) haben in den letzten Jahren ein äußerst detailliertes Bild des sichtbaren Universums gezeichnet. Für Millionen von Galaxien und Hunderttausende von Quasaren lieferten sie charakte- ▷


ANZEIGE

▷ ristische Daten, von der Entfernung bis hin zur chemischen Zusammensetzung.

Wie sich erwies, stimmten die Ergebnisse der Simulation hervorragend mit dieser Fülle an Beobachtungsmaterial überein. Von der großräumigen Netzstruktur der Galaxienverteilung über statistische Aussagen dazu, wie klumpig das Universum auf den verschiedensten Größenskalen ist, bis hin zur Verteilung der verschieden leuchtkräftigen Galaxien reproduzierten die Rechnungen originalgetreu das heutige Universum. Das freut die Astrophysiker, deren Modellvorstellungen sich somit glänzend bestätigt haben.

Als Zugabe beantwortete die Simulation eine wichtige offene Frage. Den Beobachtungen zufolge enthielt das Weltall rund 800 Millionen Jahre nach dem Urknall bereits Quasare. Diese Kerne aktiver Galaxien sind selbst über die ungeheure Distanz von knapp 14 Milliarden Lichtjahren noch sichtbar, weil sie gewaltige Energiemengen ausstoßen – rund 10 Billionen Mal so viel wie die Sonne. Bisher bezweifelte mancher, ob ihr frühes Auftauchen mit den gängigen Vorstellungen zur Strukturbildung im Kosmos vereinbar ist. Die Millennium-Simulation hat diese Zweifel jedoch zerstreut. Auch im Computer-Universum entstanden die ersten Quasare bereits nach sehr kurzer Zeit. Die Simulation zeigte auch, wo die Nachfahren dieser frühen Objekte im heutigen Universum anzutreffen sind, nämlich den Zentren der größten Galaxienhaufen.

Doch die Simulation hat nicht nur vorliegende Daten reproduziert, sondern den Ball auch elegant zu den beobachtenden Astronomen zurückgespielt. Winzige Inhomogenitäten, die durch die Wechselwirkung von früher herkömmlicher Materie mit Photonen zu Stande kamen, hatten der Hintergrundstrahlung bei ihrer Entstehung 400 000 Jahre nach dem Urknall ein charakteristisches Muster aufgeprägt. Deutliche Spuren davon sollten sich, so die Simulation, auch in der großräumigen Verteilung der Galaxien zeigen und mit genügend umfassenden Vermessungen nachweisbar sein. Verfolgt man durch Beobachtung unterschiedlich weit entfernter Sternsysteme, wie sich dieses Muster seit den Anfängen des Alls aufblähte, kann man die Expansionsgeschichte des Universums nachzeichnen und damit vielleicht ein weiteres großes Geheimnis lüften: Welches die genauen Eigenschaften der so genannten Dunklen Energie sind, durch die sich der Kosmos mit der Zeit immer schneller ausdehnt.

Markus Pössel ist promovierter Physiker und wissenschaftlicher Mitarbeiter am Max-Planck-Institut für Gravitationsphysik in Potsdam.

MEDIZIN

Baustopp für HI-Virus

Diesen Artikel können Sie auch anhören, siehe: www.spektrum.de/audio

Um den Aids-Erreger in Schach zu halten, suchen Forscher nach immer neuen Angriffspunkten. Jetzt haben sie eine Substanz entdeckt, welche die »Endmontage« und Reifung der HI-Viruspartikel stört.

Von Stefanie Reinberger

Kaum ein Krankheitserreger wurde in den letzten Jahren so intensiv erforscht wie das Humane Immunschwäche-Virus HIV. Dennoch ist es nach wie vor unbesiegt. Zwar verfügen wir heute über mehr Wirkstoffe gegen Aids als gegen jede andere Viruserkrankung. Aber eine HIV-Infektion verläuft immer noch grundsätzlich tödlich, auch wenn sich die Symptome inzwischen sehr lange unterdrücken lassen. Außerdem ist die Aids-Epidemie keineswegs gestoppt, sondern breitet sich weiter über den Erdball aus. Nach aktuellen Schätzungen leben weltweit etwa 40 Millionen Menschen mit dem Virus. Allein im letzten Jahr kamen rund 5 Millionen Neuinfizierte hinzu, und 3 Millionen Aids-Patienten erlagen den Folgen ihrer Erkrankung.

Ein Grund für diese traurige Statistik ist die enorme Wandlungsfähigkeit von HIV. Durch ständiges Verändern seiner Hülle und anderer Komponenten gelingt es ihm schnell, die Angriffe von Seiten der Medizin ins Leere laufen zu lassen. Welche Strategien Wissenschaftler auch immer ersonnen haben, stets wartete der Erreger nach einiger Zeit mit neuen resistenten Varianten auf, die der Attacke entgingen (Spektrum der Wissenschaft, 4/2004, S. 34). Um das Virus möglichst lange in Schach zu halten, muss man es daher von vielen Seiten gleichzeitig unter Beschuss nehmen und nach immer neuen Angriffspunkten suchen.

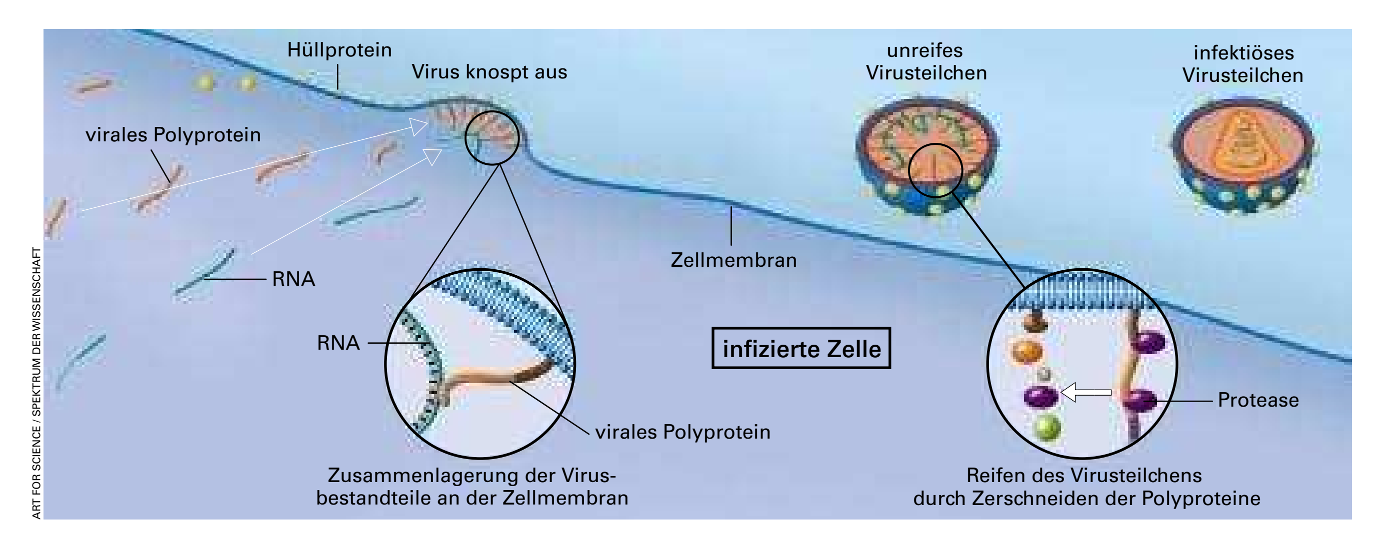
Hemmung im letzten Moment

Bei dieser Suche waren Wissenschaftler um den Virologen Hans-Georg Kräusslich von der Universität Heidelberg jetzt erfolgreich. In Kooperation mit Kollegen vom Institut für Molekulare und Strukturelle Virologie in Gif-sur-Yvette bei Paris und der englischen Universität von Southampton schafften sie es erstmals, den Zusammenbau und die Reifung der Viruspartikel im Reagenzglas zu hemmen *(Nature Structural & Molecular Biology, Bd. 12, S. 671 und S. 678)*.

Dieser Zusammenbau ist einer der letzten Schritte bei der Vermehrung des Erregers (Bild rechts oben). Nachdem sich der Eindringling im Innern seiner Wirtszelle vervielfältigt hat, sammeln sich die verschiedenen Komponenten der neuen Partikel an der Zellmembran.

Von hier knospen die Viren aus – allerdings in unfertigem Zustand: Noch hat der Eiweißmantel, der sich unter der Membranhülle befindet und das Genom umschließt, die Form einer Kugel. Er besteht aus 4000 bis 5000 Exemplaren eines Proteins namens Gag, das in diesem Stadium in einem Stück als so genanntes Polyprotein vorliegt. Im folgenden Reifungsschritt wird es dann durch ein virales Schneideenzym in diverse Untereinheiten zerlegt. Eine davon bildet – nach umfassenden Umbaumaßnahmen im Virusinnern – schließlich eine konische (kegelstumpfartige) Proteinkapsel, Capsid genannt, die als Verpackung für das Erbgut der Erregers dient. Erst in diesem Zustand sind die neuen Partikel infektiös.

Auch durch Stören des Zusammenbau-Schritts lässt sich die Virusvermehrung folglich unterbinden. Genau dies wollte Jana Sticht aus Kräusslichs Labor erreichen. Dazu suchte sie nach Peptiden, also kleinen Eiweißschnipseln, die sich gezielt an Gag-Moleküle heften – und zwar an die Untereinheit, aus der später



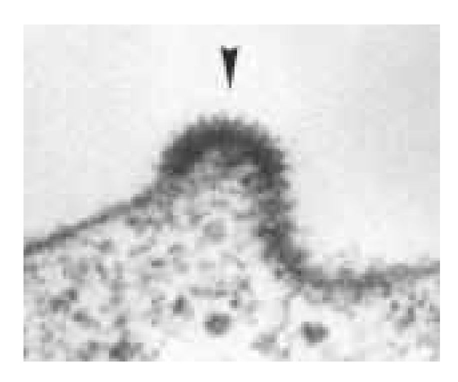
das Capsid zusammengesetzt wird. Indem die Wissenschaftlerin eine so genannte Phagenbank mit 2,7 Milliarden zufällig ausgewählten Peptiden durchprobierte, konnte sie sechzehn viel versprechende Kandidaten identifizieren. Weitere Auswahlexperimente führten schließlich zu einem Eiweißstück, das nun den Namen CAI (von englisch: *capsid assembly inhibitor*) trägt. Dieses heftet sich nicht nur spezifisch an das Gag-Molekül, sondern ist zudem in der Lage, sowohl den Zusammenbau der unreifen Hülle als auch den des eigentlichen Capsids zu hemmen – jedenfalls im Reagenzglas.

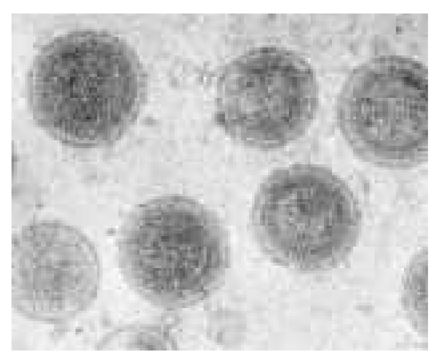
Wie ihm das gelingt, darüber lässt sich derzeit nur spekulieren. Fest steht jedoch, dass das Andocken des Eiweißschnipsels das Zusammenlagern von Gag-Molekülen oder ihren Untereinheiten nicht grundsätzlich verhindert. Zwar zeigen Röntgenstrukturanalysen von François Ternois und Felix A. Rey aus Gif-sur-Yvette, dass das störende Peptid die ▷

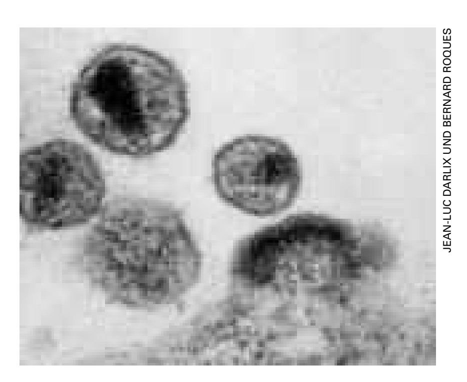
▲ Nachdem alle Bestandteile des neuen HI-Virus in der befallenen Zelle synthetisiert sind, müssen sie noch zu infektiösen Partikeln zusammengefügt werden. Dazu lagern sie sich innen an die Wirtszellmembran an und stülpen diese nach außen: Das Virusteilchen knospt aus. Sein »Polyprotein« liegt aber noch in unbearbeitetem Rohzustand vor. Es wird erst nachträglich zerschnitten und bildet dann die kegelförmige Kapsel, die im reifen Virus das Erbmaterial umschließt.


ANZEIGE


ANZEIGE







JEAN-LUC DARLIX UND BERNARD ROQUES

Die elektronenmikroskopischen Bilder zeigen die drei Stadien des Zusammenbaus von HI-Viruspartikeln. Nach dem Ausknospen eines neuen HIV-Teilchens (links, Pfeil) ist dessen Proteinmantel erst noch kugelförmig (Mitte), bevor seine Komponenten zerschnitten werden und ein konisches Capsid bilden (rechts).

▷ Struktur des Polyproteins deutlich verändert. Doch weiterführende Experimente in Zusammenarbeit mit Jörn Werner von der Universität Southampton ergaben, dass sich trotz dieser Verformung noch »Dimere« bilden können. Diese Eiweißdoppelpacks gelten als Grundstein des Zusammenbaus, der damit wohl zumindest im Prinzip möglich scheint.

Waffe mit Doppelwirkung

»Wir vermuten, dass unser Hemmstoff die Flexibilität der Capsidbausteine derart einschränkt, dass sich kein vollständiger Proteinmantel bilden kann«, deutet Kräusslich die Befunde. Dazu muss man wissen, dass in der Eiweißkapsel von HIV – im Unterschied zu vielen anderen Viren – die Anzahl der Komponenten nicht genau festgelegt ist, sondern stark variiert. Während sich also etwa beim Poliovirus eine fixe Anzahl von Bauelementen nach einem präzisen Schema zusammenfügt, mischt bei HIV der Zufall mit. »Dies erfordert eine ungeheure Flexibilität der Bausteine, die sich unter Umständen auch mal regelrecht verbiegen müssen«, erläutert Kräusslich. »Wenn aber das hemmende Peptid genau dies verhindert, können keine vollständigen, funktionsfähigen Capside mehr entstehen.«

Indem CAI den Zusammenbau sowohl der unreifen Gag-Hülle auch des fertigen Capsids unterbindet, ist es der erste HIV-Hemmstoff, der gleich zwei Entwicklungsschritte des Virus stört. »Auf Grund unserer Experimente in den letzten Jahren können wir sicher davon ausgehen, dass nicht, wie bisher angenommen, die unreife kugelförmige Hülle einfach zur reifen kegelförmigen umgebaut wird«, so Kräuslich. Vielmehr handelt es sich um zwei separate Entwicklungsschritte.

Der erste, vorläufige Mantel zerfällt vermutlich, sobald das Schneideenzym die Gag-Moleküle zerlegt hat. Danach wird in einem zweiten, separaten Schritt das konische Capsid zusammengefügt. »Weil aber das störende CAI-Peptid an den Proteinen haften bleibt, hemmt es auch beide Etappen des Zusammenbaus«, resümiert Kräusslich. Jana Sticht ergänzt: »Ein solcher Doppelinhibitor böte eine Art Sicherheitsnetz: Bei den wenigen Partikeln, in denen eventuell trotz Hemmstoff noch die unreife kugelförmige Gag-Hülle entsteht, würde wahrscheinlich der zweite Schritt verhindert.«

Doch so viel versprechend die Ergebnisse auch sind – als Medikament für eine HIV-Therapie dürfte sich CAI nicht eignen. Peptide überdauern nämlich nur eine sehr kurze Zeit im Körper. Ein noch größeres Hindernis ist, dass sie sich auch nicht in Zellen einschleusen lassen. Das aber wäre notwendig; denn der Hemmstoff muss seinen Bindungspartner Gag bereits finden, bevor alle Bestandteile von der Membranhülle eingeschlossen sind. Dennoch sieht Kräusslich in CAI mehr als nur ein Werkzeug, mit dem sich der Zusammenbau der Viruspartikel künftig besser untersuchen lässt. »Wir haben mit Hilfe dieses Peptids einen neuen Angriffspunkt gegen HIV ausgemacht,« betont er. »Nun können wir gezielt nach einem Wirkstoff suchen, der sich in ähnlicher Weise an das Gag-Protein heftet und dessen Zusammenbau stört, aber auch über Eigenschaften verfügt, die ihn als mögliches Therapeutikum qualifizieren.«

Stefanie Reinberger ist promovierte Biologin mit dem Schwerpunkt Virologie und arbeitet als freie Wissenschaftsjournalistin in Heidelberg.

KLIMATOLOGIE

Datensalat im Treibhaus

Diesen Artikel können Sie auch anhören, siehe: www.spektrum.de/audio

Klimaforscher berechnen den Einfluss von Treibhausgasen auf den Strahlungshaushalt der Erde, ohne diesen im Detail zu kennen – eine Wissenslücke, die sie gern schließen würden. Aber auch jüngste Messungen kommen noch zu teils widersprüchlichen Ergebnissen.

Von Sven Titz

Die Menschheit verstärkt den Treibhauseffekt der Erdatmosphäre – so lautet der Konsens unter den Klimaforschern. Viele Indizien deuten in der Tat darauf hin, dass wir leichtfertig an der Klimaschraube drehen: Das Schmelzen von Gebirgsgletschern oder die Erwärmung der Ozeane sprechen eine deutliche Sprache (siehe Spektrum der Wissenschaft, 1/2005, S. 50). Doch ein direkter Nachweis, dass der Mensch die globale Erwärmung wesentlich mit verursacht, steht immer noch aus.

Das Problem liegt nicht darin, den Grundmechanismus des Treibhauseffekts zu begreifen. Der ist schon lange be-

kannt. Letztlich steckt ein fundamentales physikalisches Prinzip dahinter: die Energieerhaltung. Die Erde empfängt von der Sonne Energie in Form von Strahlung, und sie muss genauso viel auch wieder loswerden, sonst bleibt sie auf dem Überschuss sitzen. Wenn die Menschheit also Treibhausgase in die Luft bläst, behindert sie die Energieabgabe, und der Globus erwärmt sich.

Globale Energiebilanz schwer bestimmbar

Um diesen Effekt experimentell nachzuweisen, muss man also die globale Energiebilanz ermitteln. Das aber hat sich als äußerst schwierig erwiesen. Zum Beispiel mangelt es – so unglaublich das im Satellitenzeitalter klingen mag – an Strahlungsmessungen in der Atmosphäre. Dieses Datenmanko behagt den Klimaforschern gar nicht. Wackelt ein Betrag in ihrer Haushaltungsrechnung, dann bleibt auch ein Spielraum beim Resultat, nämlich der Strahlungsdifferenz am äußeren »Rand« der Lufthülle. Und von der hängt schließlich ab, wie stark sich die Erdatmosphäre in Bodennähe erwärmt.

Ein anderer unsicherer Kantonist des Klimasystems ist die Albedo: das Ausmaß, in dem die Erde Sonnenlicht ins All zurückwirft. Von der solaren Strahlung, die auf den Globus trifft, werden ungefähr dreißig Prozent unmittelbar in den Weltraum reflektiert – zur Hälfte von Wolken und ansonsten von feinen Schwebteilchen in der Luft (Aerosolen) sowie von der mehr oder weniger stark spiegelnden Land- und Meeresoberfläche. Die Erde hat demnach eine mittlere Albedo von etwa 0,3. Doch unklar ist noch, wie stark dieser Wert zeitlich schwankt – zum Beispiel, wenn sich die Wolkenbedeckung ändert.

Instrumente an Bord von Satelliten erfassen die Albedo zwar schon seit Mitte der 1960er Jahre. Aber es gibt zahlreiche Messprobleme, die mit der Eichung, der Alterung und dem allmählichen Absinken der Messsonden auf ihren Umlaufbahnen zusammenhängen. Deshalb sind die Resultate teils widersprüchlich.

Angesichts dieser Situation zogen Forscher vor einem Jahr sogar den Mond heran, um die Albedo der Erde zu bestimmen *(Science, Bd. 304, 28. 5. 2004, S. 1299)*. Ihre Methode war trickreich, aber nicht neu: Enric Pallé und seine Kollegen am New Jersey Institute of Technology in Newark maßen von einem Observatorium aus die schwa- ▷

Damit die globale Mitteltemperatur konstant bleibt, muss die Energiebilanz unseres Planeten ausgeglichen sein. Dann entspricht die Gesamtenergie des einfallenden Sonnenlichts exakt der Wärmemenge, die der Globus abstrahlt. Beide Größen werden seit Jahren von dem Radiometer Ceres gemessen, das gleich auf mehreren Satelliten stationiert ist. Die beiden Karten beruhen auf Ceres-Daten und zeigen die Intensität des reflektierten Sonnenlichts (rechts) und der abgestrahlten Wärme im April 2001.

100 150 200 250 300

abgestrahlte Wärmeenergie in Watt pro Quadratmeter

0 50 100 150 200

reflektierte Sonnenenergie in Watt pro Quadratmeter

NASA / GSFC / CERES / TOM BRIDGMAN

▷ che, kurzwellige Strahlung von der Schattenseite des Monds. Diese Region erhält nur indirekt Sonnenlicht, das von der Erde reflektiert wurde. Ihre Helligkeit hängt also von der irdischen Albedo ab. Diese habe, so das Ergebnis der Messung, seit 2000 deutlich zugenommen. Allerdings ist die Verlässlichkeit der Methode umstritten.

So nimmt es nicht wunder, dass Forscher um Bruce Wielicki vom Nasa Langley Research Center nun genau zum gegenteiligen Resultat kommen *(Science, Bd. 308, S. 825)*. Sie haben Messdaten des Radiometers Ceres ausgewertet, das auf verschiedenen Satelliten gleichzeitig eingesetzt wird. Ihrer Analyse zufolge ist die Strahlung, welche die Erde insgesamt ins All reflektiert, zwischen März 2000 und Februar 2004 um ungefähr ein halbes Prozent zurückgegangen. Demnach hätte sich die Albedo nicht erhöht, sondern sogar verringert.

Wie drei Klimaforscher in einem gemeinsamen Kommentar dazu anmerken, widersprechen sich die Ergebnisse der unterschiedlichen Messungen nicht nur, sondern unterscheiden sich auch von den Vorhersagen der Theoretiker *(Science, Bd. 308, S. 806)*. Das liege daran, dass man nicht direkt von den jeweiligen Daten auf die Albedo rückschließen könne, sondern nur auf dem Umweg über ungesicherte Modellvorstellungen und Grundannahmen. Als Ausweg wird eine noch umfassendere Analyse der Messdaten von Satelliten vorgeschlagen. Diese aber ist gefährdet, weil das Budget der Nasa gekürzt wurde.

Ende der globalen Verdunklung

Wenn Wielickis Ergebnis stimmt und die irdische Albedo sich tatsächlich verringert hat, kann das unterschiedliche Gründe haben – so einen Rückgang der eisbedeckten Regionen oder einschneidende Änderungen in der Vegetation: Ackerflächen reflektieren zum Beispiel mehr Sonnenlicht als Wälder. Möglicherweise wirft aber auch die Atmosphäre inzwischen weniger solare Strahlung ins All zurück, weshalb mehr davon am Boden ankommt.

Messungen an der Erdoberfläche scheinen das zu bestätigen. So fanden Wissenschaftler um Martin Wild von der Eidgenössischen Technischen Hochschule Zürich heraus, dass vor rund 15 Jahren jene mysteriöse Verdunklung aufgehört hat, die als »global dimming« bekannt geworden ist: Ab 1960 hatte weltweit die am Boden eintreffende solare Strahlung abgenommen. Seit 1990 wird es jedoch wieder »heller« – mehr Sonnenlicht schafft den Weg durch Wolken, Luft und Aerosole bis hinab zur Erdoberfläche *(Science, Bd. 308, S. 847)*.

Da die Intensität der Sonne seit Jahrzehnten ungefähr konstant ist, muss die neuerliche Aufhellung mit einer größeren Durchlässigkeit der Atmosphäre zusammenhängen. Dafür spricht auch, dass es in Indien keine Trendwende gab. In dem Schwellenland, das derzeit eine rasante Industrialisierung erlebt, herrscht nach wie vor oft dicker Smog.

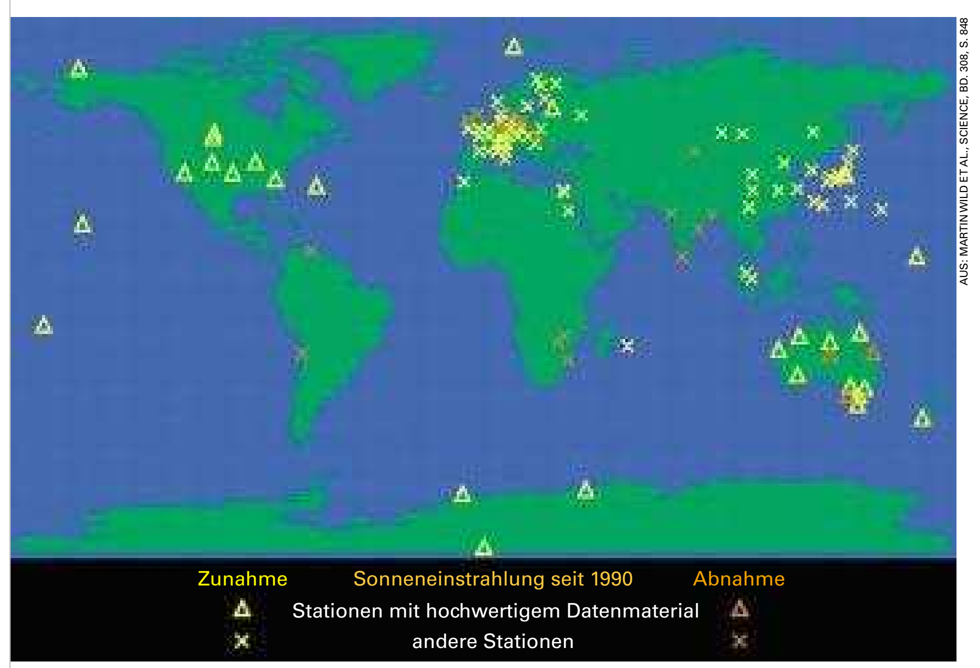
So erfreulich die reinere Luft für Umweltschützer ist, so sehr schadet sie allerdings dem Klima: Wenn mehr Sonnenlicht auf den Boden trifft, fördert das die globale Erwärmung. Den Messungen des Teams um Wild zufolge ist der Effekt beträchtlich: Zwischen 1992 und 2002 nahm die Sonneneinstrahlung (Insolation) an den Bodenstationen im Mittel um mehr als sechs Watt pro Quadratmeter zu. Allerdings sind die Daten, auf denen diese Zahl basiert, äußerst ungleichmäßig über die Erdkugel verteilt. Messungen über dem Meer fehlen sogar völlig.

Die Unsicherheiten in der Berechnung des Strahlungshaushalts sind also noch erheblich. Das zeigt auch die aktuelle Studie eines Teams um Ehrhard Raschke von der Universität Hamburg *(International Journal of Climatology, Bd. 25, S. 1103)*. Mit Hilfe von Satellitendaten und vielen Messwerten aus der Atmosphäre und vom Erdboden berechneten die Wissenschaftler die Strahlungsbilanz neu und verglichen ihr Ergebnis mit dem von zwei früheren Untersuchungen. Die Unterschiede sind gewaltig. Die globalen Mittelwerte für die Insolation und die Energieabstrahlung der Erde differieren um bis zu 30 Watt pro Quadratmeter – ein Vielfaches dessen, was als menschengemachter Treibhauseffekt diskutiert wird.

Die experimentellen Klimaforscher stehen mithin vor einer großen Herausforderung: Sie müssen versuchen, die Strahlungsmessungen zu präzisieren und so die Widersprüche aufzulösen. Dies ist von eminenter Bedeutung, um die Ursachen und Folgen des Klimawandels besser zu begreifen. Zugleich sollte es helfen, die Verlässlichkeit und Überzeugungskraft der Klimaszenarien aus dem Computer zu erhöhen.

Sven Titz ist promovierter Meteorologe und freier Wissenschaftsjournalist in Berlin.

Nach Untersuchungen von Martin Wild an der Eidgenössischen Technischen Hochschule Zürich hat sich die Erdatmosphäre in den vergangenen zehn Jahren aufgehellt. An den gelb markierten Messstellen auf dieser Weltkarte ist die Sonneneinstrahlung seit den 1990er Jahren gestiegen, an den orangefarbenen dagegen zurückgegangen.



AUS: MARTIN WILD ET AL., SCIENCE, BD. 308, S. 848

Springers
EINWÜRFE von Michael Springer

Natur als Risiko

Vor dem Klimawandel schützt keine Versicherung.

Die Gedanken sind frei, das heißt es kostet normalerweise nichts, eine Meinung zu haben. Nur wenn es um Geld geht, wird der Meinungsstreit unversöhnlich. Nehmen wir den Klimawandel. Nach Ansicht der einen Fraktion, repräsentiert durch das Intergovernmental Panel on Climatic Change (IPCC) der UNO, destabilisiert der von Menschen verursachte Ausstoß von Treibhausgasen das globale Klima, wogegen die Menschheit etwas unternehmen müsse. Die andere Fraktion, politisch angeführt durch die gegenwärtige US-Regierung, hält das für nicht bewiesen. Schließlich sei das Klima ein hochkomplexes Phänomen, dessen Entwicklung nur mit stark vereinfachten Computermodellen simuliert werden kann. Darum sei es voreilig, die Volkswirtschaften mit teuren Klimaschutzprogrammen zu belasten.

Nun ist Untätigkeit keineswegs kostenlos: Je länger man wartet, desto teurer wird es später, mit den Folgen des weiter gestiegenen Treibhauseffekts fertig zu werden. So hat der Hurrikan Katrina der Frage Nachdruck verliehen, ob sich nur rein zufällig seit ein paar Jahrzehnten besonders heftige Wirbelstürme signifikant häufen oder ob daran die nachweislich tendenziell steigende Oberflächentemperatur der Ozeane schuld sein könnte *(Science, Bd. 309, S. 1844)*.

Doch solche hypothetischen Zusammenhänge werden, da nur statistisch belegbar, im rabiaten Streit der Meinungen schnell zerfetzt. Da ist es ratsam, sich an eine Interessengruppe zu halten, die zwar auch mit Statistiken hantiert, aber vor allem mit Geld, viel Geld: die Versicherungsgesellschaften.

Wenige Tage bevor Katrina über den Süden der USA hereinbrach, erschien in Science ein Artikel über »Versicherung in einem Klima des Wandels« *(Bd. 309, S. 1040)*. Der Ingenieur und Ökonom Evan Mills vom Lawrence Berkeley National Laboratory stellt darin fest: Die Schadenskosten wetterbedingter Naturkatastrophen steigen ständig, wovon nur ein Bruchteil – in den USA ein knappes Viertel – durch Versicherungen kompensiert wird. Dabei machen kleinere Unbilden, die gar nicht die Schlagzeilen erreichen, rund 60 Prozent der Gesamtbilanz aus. Insgesamt entsteht ein gigantischer – und stetig wachsender – volkswirtschaftlicher Schaden, der nur ausnahmsweise, siehe Katrina, ins öffentliche Bewusstsein dringt.

Vom Standpunkt der Versicherungswirtschaft ist es ziemlich müßig, in der Schadensbilanz pure Klimafolgen säuberlich von all den anderen Faktoren zu trennen, die sich sämtlich unter »Anfälligkeit der Gesellschaft für Katastrophen« rubrizieren lassen. Eine Region wird mit wachsendem Wohlstand und moderner Produktion verwundbarer – einfach deshalb, weil von den Naturgewalten mehr angesammelte Werte vernichtet werden können. Wenn eine technologisch hochgerüstete Gesellschaft es versäumt, sich nicht nur im Kleinen, sondern auch im Großen vor Wind und Wetter zu schützen, bezahlt sie für diese Unterlassung am Ende Unsummen.

Im erwähnten Science-Heft sinnieren die Umweltökonomen Brad Allenby und Jonathan Fink von der Arizona State University in Tempe darüber, wie eine inhärent katastrophenresistente Gesellschaft beschaffen sein müsste. Wie sie meinen, bietet gerade die hochtechnische Struktur moderner Gemeinwesen mit fortgeschrittener Urbanisierung und Vernetzung dafür beste Chancen – sofern man aufhört, Überschwemmungen, Dürren oder Orkane als lokal begrenzte Phänomene zu betrachten. Bei der Vorsorge gegen Naturkatastrophen, die vermeintlich immer nur anderswo eintreten, steckt die viel beschworene Globalisierung noch in den Kinderschuhen.

Michael Springer

Krieg in der Wüste

Fast nebenbei erobert, erwiesen sich die römischen Provinzen im Orient bald als schwer zu halten. Mancher Kaiser Roms scheiterte im Kampf gegen die kriegerischen Völker Persiens.

Von Theodor Kissel

Palmyra, Dura Europos, Ctesiphon – klangvolle Namen vom östlichen Ende der römischen Welt. Bis in das heutige Syrien hinein entsandte das Imperium seine Legionen. Doch stabil war die Lage an jener fernen Grenze stets nur für kurze Zeit. Vor allem im heutigen Persien entstanden mit den Parthern und später den Sasaniden gefährliche Gegner. Archäologen stießen in den letzten Jahren auf Spuren verheerender Niederlagen: eingestürzte Wehrtürme, Gebeine römischer Legionäre in Verteidigungsstollen, Brandspuren. Aber auch erfolgreiche Gegenmaßnahmen können die Wissenschaftler nachweisen: vorgeschobene Kastelle, die besser zu verteidigen waren, Lager hinter dem Orient-Limes, von denen aus mobile Einheiten schnell zu den Brennpunkten gelangten.

Roms Orientengagement begann schon bald nach dem 2. Punischen Krieg (218–201 v. Chr.). Die Tibermetropole beherrschte inzwischen ganz Italien, hatte die verhassten Karthager besiegt (Spektrum der Wissenschaft, 12/2004, S. 26) und war dabei, Spanien zu unterwerfen. Doch nun entstanden neue Großmächte im östlichen Mittelmeerraum. Den Anfang machte der junge Makedone Philipp V., der nach Vorherrschaft im griechischen Kulturraum strebte. Rom schickte seine Legionen und erstickte diese Ambitionen 197 v. Chr. im Keim, doch keine fünf Jahre später streckte der Seleukidenherrscher Antiochos III. (siehe Kasten S. 26) seine Fühler nach Kleinasien und sogar nach Griechenland aus. Ganz offenbar hatte er sich überschätzt. Am Ende mussten sich die Seleukiden mit einem kläglichen Rest bescheiden, der dann 64 v. Chr. auch noch dem Imperium einverleibt wurde. Rom stand nun am Euphrat, der mehrere Jahrhunderte die östliche Grenze markierte (siehe Karte S. 28).

Ein Aufstand 272 n. Chr. kam dem Imperium recht, um in der Oase Palmyra ein Legionslager zu installieren und so seine Ostgrenze zu sichern. Im Bild: die Säulen der Prozessionsstraße.

Aus urheberrechtlichen Gründen können wir Ihnen die Bilder leider nicht online zeigen.

Zwar fehlte es nicht an Versuchen, weiter zu expandieren. Doch auf der anderen Seite des Flusses herrschten die Parther (siehe Kasten S. 26), die dem römischen Feldherrn Crassus 53 v. Chr. bei Carrhae eine empfindliche Niederlage bereiteten und selbst immer wieder den Euphrat überschritten. Offenbar waren diese neuen Gegner aus anderem Holz geschnitzt und die Sicherung der Grenze war eine dringlichere Aufgabe als weitere Gebietsgewinne. Roms erster Kaiser Augustus (63 v. Chr. – 14 n. Chr.) verlegte römische Legionen in den Orient, unter den flavischen Kaisern (sie regierten 69 – 96 n. Chr.) entstanden Legionslager, Kastelle und Beobachtungsposten am Euphrat, verbunden durch eine befestigte Straße. Von Trapezus am Schwarzen Meer bis nach Sura im Norden Syriens verlief dieser Limes, doch anders als sein obergermanisch-rätisches Pendant war er nicht durchgängig befestigt, sondern auf strategisch wichtige Punkte wie Furten und Flussübergänge konzentriert. Einer davon war Zeugma, das unlängst durch die eilig von der Unesco anberaumten internationalen Rettungsgrabungen einer breiteren Öffentlichkeit bekannt wurde.

Das Verhältnis zwischen Römern und Parthern blieb auch im folgenden Jahrhundert gespannt, mal herrschte friedliche Koexistenz, dann wieder suchte eine Seite den militärischen Erfolg, etwa die Kaiser Trajan (Regierungszeit 98 – 117 n. Chr.) und Lucius Verus (er regierte 161 – 166 n. Chr). Doch nichts vermochte das Mächtegleichgewicht im Osten wesentlich zu verschieben.

Auf den Spuren Alexanders

Das änderte sich erst zu Beginn des 3. Jahrhunderts n. Chr., als die Kaiser aus dem Herrscherhaus der Severer (sie regierten 193 – 235 n. Chr.) einer regelrechten fixen Idee verfielen: Imitatio Alexandri, Nachahmung Alexanders, lautete die Parole. Auf den Spuren Alexanders des Großen wandelnd nutzten die römischen Feldherrn eine Schwäche des Feindes, unter anderem durch Streitigkeiten um den Thron, und stießen weit nach Osten vor, bis vor die Tore Ctesiphons, der parthischen Hauptstadt. Die Verwaltungsbeamten konnten zwei neue Provinzen verzeichnen: Osrhoena und Mesopotamia. Drei neue Legionen wurden aufgestellt, befestigte Lager entstanden nun auch jenseits des Euphrat. Roms Limes im Orient verlief jetzt entlang der Linie Chabur – Gebel Singar – Tigris.

Über diese Phase römischer Ostpolitik war bislang nur wenig bekannt. Erst vor wenigen Jahren lokalisierten deutsche Wissenschaftler einige Militäranlagen anhand von Luftbildaufnahmen und begannen sie auszugraben. Einer von ihnen ist Markus Gschwind vom Deutschen Archäologischen Institut in Damaskus. Er legt seit 2002 das Römerlager Qreiye frei, zwölf Kilometer nordwestlich der modernen syrischen Stadt Deir ▷

▲ Kompakt und leicht zu verteidigen, so gab sich der neue Kastelltyp der Spätantike. Das Bild zeigt ein Lager aus der Zeit des Kaisers Diokletian, heute Qasr Bushir in Jordanien.

ez-Zor gelegen. Mit Hilfe geomagnetischer und geoelektrischer Prospektion orteten die Archäologen das im Erdreich verborgene Mauerwerk des Kastells und setzten dann den Spaten gezielt an. Die quadratische Anlage auf einem Basalthügel oberhalb des Euphrat maß demnach 220 Meter Seitenlänge. Wahrscheinlich hat Kaiser Septimius Severus sie im Zug der Partherfeldzüge (195–198 n. Chr.) bauen lassen. Alles passt in dieses Bild: Die Festung wurde Keramikfunden zufolge kurz vor 200 n. Chr. errichtet. Mit ihrer aus einem doppelten Wall-Graben-System und einer Wehrmauer mit vier Toren, vier Ecktürmen und acht Zwischentürmen bestehenden Umwehrung entsprach sie weit gehend dem herrschenden Standard der ersten beiden nachchristlichen Jahrhunderte. Seit Kurzem ist auch der Name der bis zu 1500 Soldaten starken Einheit bekannt. Denn im Stabsgebäude *(principia)* fanden die Archäologen einen rund vier Zentner schweren Gipssteinblock mit einer Inschrift, die von der Weihezeremonie einer Hilfstruppe *(auxilia)* aus der Felsenstadt Petra im heutigen Jordanien berichtet.

Diese einstige Hauptstadt der Nabatäer lag mehr als 1000 Kilometer südlich, doch es war gebräuchliche Praxis der Militärverwaltung, in unterworfenen Gebieten Hilfstruppen auszuheben und dann so weit als möglich von ihrer Heimat entfernt zu stationieren. Eine einfache, doch wirkungsvolle Strategie. Denn ohne den Rückhalt des eigenen Volks verhielten sich Soldaten loyal zum Reich, das sie ernährte. Doch häufig lebten sie im Nirgendwo. So auch in Qreiye: Die nächstgrößere Stadt Palmyra lag acht bis zehn Tagesreisen entfernt.

Harter Drill an der Front

Abkommandierungen zu benachbarten Lagern oder Dienstreisen zum Büro des Statthalters waren da willkommene Abwechslungen. Und wenn man Glück hatte, bekam man auch für ein paar Tage Urlaub, lateinisch *commeatus*, etwa zur Regelung privater Angelegenheiten oder für einen Besuch der Familie (davon berichtet ein Papyrus aus dem unterägyptischen Karanis). Oder schlicht zur Rekonvaleszenz, denn der Lagerdienst weitab der Zivilisation war hart, davon berichten die in Dura Europos gefundenen Dienstpläne der 20. Palmyrenerkohorte. Kräftezehrende Schanzarbeiten, pausenloser militärischer Drill und Wachdienst bei Temperaturen von über vierzig Grad im Schatten, den Feind im Blick, der jenseits des Euphrat lauerte. Auch die Nahrungsbeschaffung gestaltete sich mühsam. Im Schweiße ihres Angesichts bauten die Soldaten in der fruchtbaren Schwemmlandebene des Euphrat Getreide und Gemüse an, kauften oder tauschten mit Einheimischen Lebensmittel, requirierten aus dem Umland oder besorgten sich Zukost über fahrende Händler, sofern sich diese in derart entlegene Gegenden verirrten. Gerade mal dreißig Lenze erreichte der römische Frontsoldat deshalb im Durchschnitt, wie man auf Grabinschriften überall im Imperium Romanum nachlesen kann. In der gottverlassenen Einöde von Qreiye konnten nur echte Söhne der Wüste wie die Nabatäer überleben, zudem waren sie im Wüstenkrieg erprobt.

Die Reiche der Achämeniden und Seleukiden

Das Geschlecht der Sasaniden war das letzte in einer Reihe von »persischen« Herrscherdynastien, die sich von der Mitte des 1. Jahrtausends v. Chr. bis zur islamischen Eroberung im Jahr 642 n. Chr. auf dem Gebiet des heutigen Iran etablierten und von dort aus die Völker Asiens in einem Reich vereinten.

Den Anfang machten die Achämeniden (550–330 v. Chr.), deren Riesenreich vom Indus bis zum Mittelmeer, von den Wüsten Libyens bis zu den Steppen Zentralasiens reichte. Diese Herrscher, allesamt aus der iranischen Kernprovinz, der Persis, hervorgegangen, galten als von dem Gott Ahuramazda erwählt und als seine Stellvertreter auf Erden eingesetzt. Von Persepolis aus, der »reichsten Stadt unter der Sonne«, regierte der »König der Könige« sein Reich. Doch als Alexander der Große 334 v. Chr. in Asien einfiel, eroberte er Persien innerhalb weniger Jahre.

Nach dem frühen Tod ihres Feldherrn teilten sich Alexanders Generäle das Weltreich, in Asien übernahm Seleukos I. die Macht. Er begründete die Dynastie der Seleukiden (312–64 v. Chr.). Um 250 v. Chr. drangen die Parner, ein halbnomadisches Volk aus den Steppen südlich des Aralsees, in das Reich ein und besetzten dessen Provinz Parthien – daher der spätere Name Parther.

Da sich die Seleukiden im Westen zudem seit Beginn des 2. Jahrhunderts mit der neuen Großmacht Rom konfrontiert sahen, hatten sie dem parthischen Expansionsdrang wenig entgegenzusetzen. 141 v. Chr. fiel Seleukia, 129 v. Chr. ganz Mesopotamien in die Hände der Parther, die nun am Euphrat standen. Als das römische Imperium den letzten Seleukidenherrscher entmachtete, war ein Krieg zwischen den Großmächten unausweichlich.

Das Reich der Seleukiden und seine Nachbarn um 230 v. Chr.



EMDE-GRAFIK / SPEKTRUM DER WISSENSCHAFT, NACH: THEODOR KISSEL

Aus urheberrechtlichen Gründen können wir Ihnen die Bilder leider nicht online zeigen.

Siegesrelief Shapurs bei Bishapur: machtvolle Demonstration ihres Herrschaftsanspruchs

Weitere Spuren römischer Präsenz jenseits des Euphrat kamen im 120 Kilometer weiter nordöstlich gelegenen assyrischen Siedlungshügel Dur-Katlimmu/Seh el-Hamad zu Tage. Dort, an den Ufern des Chabur, stieß der Berliner Archäologe Hartmut Kühne unter meterdicken Erdschichten auf die Reste eines römischen Lagers, das anhand von Münzen auf die gleiche Zeit wie Qreiye datiert wurde. Mit hoher Wahrscheinlichkeit handelt es sich dabei um Magdala, das die Althistoriker bislang nur aus Papyri von Dura Europos kannten – die Besatzung war von dort abkommandiert worden. Und damit nimmt die römische »Maginot-Linie« im Orient zu Beginn des 3. Jahrhunderts n. Chr. Gestalt an, zu der auch die schon bekannten Festungen Zagurae/Ain Sinu, östlich des Gebel Sinjar, und Castra Maurorum/Seh Qubba, 100 Kilometer nordöstlich von Mosul zählen.

Militärpräsenz war damals dringend erforderlich, denn im Jahr 224 n. Chr. erhob sich in der antiken Landschaft Persis, der Region um das heutige Shiraz im Südwesten Irans, ein Vasall des Partherkönigs namens Ardashir gegen seinen Herrn. Seit den Eroberungszügen Alexanders des Großen hatten traditionalistisch gesinnte Bevölkerungsgruppen der Verbreitung eines griechischen Geists tatenlos zugesehen. Getragen von einer national-persischen Bewegung begründete Ardashir das Herrscherhaus der Sasaniden (gelegentlich findet man auch die Schreibweise mit Doppel-»s«, sie ist jedoch falsch, da sich die Dynastie auf Sasan, einen Anfang des 3. Jahrhunderts n. Chr. nahe Persepolis wirkenden Priester, zurückführte). Demonstrativ stellte Ardashir sich in die Tradition der Dynastie der Achämeniden, deren Könige einst ebenfalls von der Persis aus ein Weltreich begründet hatten (siehe Kasten).

»Was ihr Römer in Asien besetzt, ist mein Erbe«

Iranische Werte und religiöse Vorstellungen verdrängten die hellenistisch geprägten Ideale der Seleukiden und Parther. So umgaben sich die Sasanidenkönige wie ihre achämenidischen Vorfahren mit einer Aura des Göttlichen. Als irdischer Stellvertreter Ahuramazdas, des obersten Gottes im iranischen Pantheon, waren sie ausgestattet mit dem *farnah*, einem von ihm verliehenen »göttlichen Glanz«, der sie weit über ihre adligen Standesgenossen hinaushob.

Bildlichen Ausdruck fand diese Erwählung in so genannten Investiturreliefs: Hoch zu Ross sitzend, empfangen die Sasaniden den Ring der Herrschaft aus den Händen Ahuramazdas. Um ihre göttliche Legitimation und absolute Macht noch zu unterstreichen, ließen sie diese Reliefs in Naqsh-i Rustam aufstellen, dem Begräbnisplatz der achämenidischen Könige. Im Angesicht der Denkmäler ihrer vorgeblichen Ahnen dokumentierten die neupersischen Herrscher ihr Selbstverständnis als »Könige der Könige« – ein Titel, den bereits die achämenidischen Urahnen trugen.

In deren Tradition geboten die Sasaniden über ein feudalistisch strukturiertes Reich mit starker Zentralgewalt. Doch die Rückbesinnung auf das altpersische Erbe beschränkte sich keinesfalls auf die Innenpolitik. »Das, was ihr Römer in Asien besetzt, ist mein Erbe«, verkündete Ardashir etwa sechs Jahre nach seiner Machtergreifung. Mit diesen Worten begann ein mehr als 400 Jahre dauerndes Ringen der beiden Großmächte.

Die Besatzungen von Qreiye und Magdala sowie die übrigen Grenzposten an Euphrat und Chabur dürften nun in höchste Alarmbereitschaft versetzt worden sein. Als die mesopotamische Karawanenstadt Hatra um die Mitte der 30er Jahre des 3. Jahrhunderts angesichts der sasanidischen Bedrohung römische Hilfe erbat, verlegte die westliche Supermacht mit der *cohors XI Maurorum Gordiana* eine aus nordafrikanischen Maurenstämmen rekrutierte und somit wüstenerprobte Einheit nach Hatra. Trotz aller Vorsichtsmaßnahmen gerieten die Legionen schnell in die Defensive, als die persischen Reiterkrieger in Mesopotamien, später in Syrien einfielen. Vor allem das taktische Zusammenwirken von schwer ▷

bewaffneter Panzerreiterei und leichter Bogenschützenkavallerie brachte die Römer ein ums andere Mal in Bedrängnis.

Letztere hatte den Legionären schon in der Schlacht von Carrhae gegen die Parther schwere Verluste zugefügt. »Ehe man die Schützen sieht, durchbohren ihre Pfeile das getroffene Ziel«, hatte der griechische Historiker Plutarch (50–120 n. Chr.) rückblickend notiert. Wie tausendfach zuvor verließ sich das Imperium auf bewährte Kampfformationen wie die »Schildkröte« *(testudo)*, bei der Legionäre geschlossen vorrücken und dabei ihre Reihen mit Schilden nach den Seiten und auch nach oben sichern. Doch die persischen Pfeile bohrten sich mühelos durch dieses eiserne Dach.

Deren Durchschlagskraft konnte offenbar schon in der Antike bestimmt werden. Ein »De arcu« (»Über den Bogen«) genanntes Handbuch über die Anleitung zum Bogenschießen aus dem 2. Jahrhundert n. Chr., das fragmentarisch in dem um 600 n. Chr. entstandenen Werk »De re strategica« (»Über die Strategie«) des frühbyzantinischen Militärtheoretikers Syrianus Magister erhalten ist, beschreibt eine Vorrichtung zur Ermittlung der Wucht eines Pfeils. Leider bricht die überlieferte Stelle dann aber ab, sodass genaue Angaben fehlen. Am Hofe des Königs Abgar VIII. von Osrhoene, das zeitweilig römische Provinz war, soll um 210 n. Chr. sogar die Geschwindigkeit der Pfeile experimentell gemessen worden sein, von Kennern der Materie: einem Skythen und einem Parther. Dem christlichen Schriftsteller Sextus Iulius Africanus (160/170–240 n. Chr.) zufolge hätten zehn mit persischen Bögen ausgestattete Schützen nacheinander Pfeile abgeschossen, und zwar immer dann, wenn das vorige Geschoss eingeschlagen war. Die Distanz betrug 1/6 Stadion, was einer Länge von 185 Metern entspricht. Insgesamt legten die Pfeile 1000 Stadien pro Stunde zurück. Wie dabei die Zeit gemessen wurde, geht aus der Quelle leider nicht hervor, doch Iulius Africanus errechnete 24 000 Stadien pro Tag und gab noch 1000 Stadien hinzu, um die Reaktionszeit zu kompensieren. In heutigen Maßen flogen die persischen Pfeile demnach 192,7 Kilometer pro Stunde.

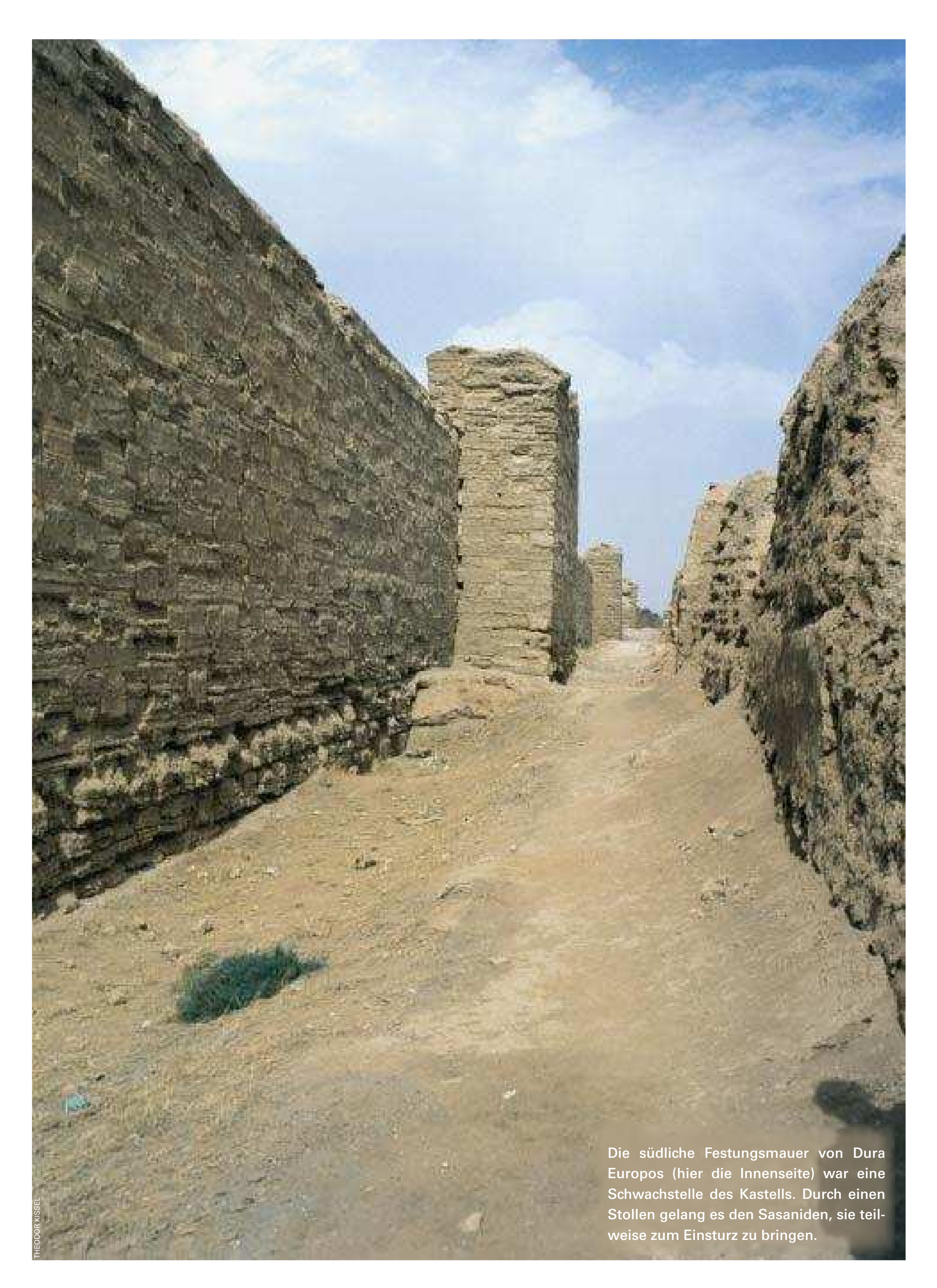
Zur Sicherung der Krisenregion am Euphrat installierte das Imperium in zwei Phasen seinen Orient-Limes.

Diese enorme Geschwindigkeit beruhte auf der Konstruktion der persischen Reflexbögen: Mehrere Materialschichten aus Holz, Horn und Tiersehnen, in einem langwierigen Prozess miteinander verleimt, verliehen dem Bogen eine hohe Spannkraft. So bestand der Vorteil von Sehnen und Horn in ihrer höheren Fähigkeit, Energie zu speichern und dann an den Pfeil abzugeben. Hinzu kam, dass der Reflexbogen entgegen seiner natürlichen Krümmung gespannt wurde, was seine Spannung und damit seine Durchschlagskraft vervielfachte.

Gepanzert mit vierzig Kilogramm Erz

Nicht weniger gefürchtet waren die persischen Panzerreiter *(clibanarii)*, mobile Festungen, die von antiken Autoren oft mit reitenden Erzstatuen verglichen wurden. Verpackt in einer Panzerung aus untereinander mit Draht verbundenen Bronzeplättchen stürmten sie auf ihren groß gewachsenen Schlachtrossen auf die feindlichen Linien zu und verbreiteten Angst und Schrecken.

Der aus Syrien stammende Schriftsteller Heliodor (3. Jahrhundert n. Chr.) beschrieb die Panzerung und Wirkung der *clibanarii* in seinem Roman Aitiopika (IX, 15): »Der Panzer ist folgendermaßen beschaffen: viereckige geschmiedete Platten, etwa eine Handspanne lang, fügt man so aneinander, dass sie sich horizontal und vertikal überlappen, und nestelt sie an den Rändern zusammen. So entsteht eine schuppige Hülle, die sich bequem um den Körper schmiegt, die Gliedmaßen umschließt und sich zusammenzieht und ausdehnt, ohne die Bewegungen zu behindern (...). Gepanzert und gleichsam eingeschachtelt, besteigt der Reiter das Pferd. Er springt nicht selbst auf, sondern muss wegen seiner Belastung von anderen hinaufgehoben werden. Kommt es zum Kampfe, lässt er dem Pferde die Zügel frei, gibt ihm die Sporen und braust wie ein Mann aus Eisen oder eine lebende eherne Statue klirrend gegen den Feind. Die Lanze ragt, waagrecht eingelegt, mit ihrer Spitze weit voraus und wird von einer Schlaufe am Pferdehals gehalten. Das Schaftende hängt in einer Schlinge am Schenkel des Pferdes und gibt dadurch beim Anprall nicht nach, sondern unterstützt die Hand des Reiters, der den Stoß nur zu lenken braucht. Wenn



THEODOR KISSEL

Die südliche Festungsmauer von Dura Europos (hier die Innenseite) war eine Schwachstelle des Kastells. Durch einen Stollen gelang es den Sasaniden, sie teilweise zum Einsturz zu bringen.

▷ er sich in die Lanze legt und mit der ganzen Wucht seines Ansturms einstemmt, durchbohrt er alles, was ihm in den Weg kommt und hebt mit einem Stoß bisweilen zwei Leute empor.« Diese Waffengattung, sie gilt als Vorläufer der Reiter des abendländischen Mittelalters, war freilich wegen ihrer eingeschränkten Beweglichkeit (neueren Schätzungen zufolge wog die Rüstung eines *clibanarius* einschließlich seiner Waffen vierzig Kilogramm) nur in offener Feldschlacht effektiv.

Das ohnehin durch innere Machtkämpfe geschwächte Imperium hatte der tödlichen Kombination aus Panzerreitern und Bogenschützen (siehe Bild unten) nichts entgegenzusetzen: Seit der letzte Herrscher aus der Dynastie der Severer 235 n. Chr. einem Staatsstreich zum Opfer gefallen war, hielt sich kein Kaiser länger als ein paar Jahre, 238 n. Chr. zählte man gar sechs verschiedene Imperatoren auf dem Thron. Wie ein Kartenhaus brach das römische Verteidigungssystem im Orient zusammen. Um 240 n. Chr. fielen Hatra und Nisibis, die Hauptstadt der erst wenige Jahre zuvor eingerichteten Provinz Mesopotamia. Nach einer Gegenoffensive unter Kaiser Gordian III. (242–244 n. Chr.), der die Legionen den Euphrat abwärts bis nach Babylonien führte, gelang es Shapur I., Sohn des Ardashir, die Eindringlinge 244 n. Chr. bei Misiche zu besiegen. Zu allem Unglück fiel dort der Kaiser; sein Nachfolger Philippus Arabs (244–249 n. Chr.) musste in einem schmachvollen Frieden den Abzug seiner Legionen zurück nach Syrien erkaufen.

Im Jahr 256 n. Chr. eroberten die Sasaniden Dura Europos, Roms wichtigste Bastion am Euphrat. Hier zeigten die Perser, dass sie auch in der Belagerungstechnik Meisterschaft erlangt hatten. Die gewaltige Anlage hatte eine große Schwachstelle: ihre zur Wüste hin offene Südflanke. Denn dort bot der sandige Boden die Voraussetzung, die Festung zu untergraben.

Kampf auf Leben und Tod unter der Erde

Noch heute sind die Belagerungsstollen (*cuniculi*, »Kaninchenbauten«) zu erkennen, mit denen die Perser die Türme und Teile der Befestigungsmauern zum Einsturz brachten. Diese Belagerungsmethode hat der römische Militärschriftsteller Vegetius um 400 n. Chr. in seinem »Handbuch der Kriegskunde« so beschrieben: »Wenn die Angreifer an die Fundamente der Stadtmauer gelangt sind, untergraben sie ein möglichst großes Stück und stellen trockene Holzstützen darunter. Mit dieser provisorischen Konstruktion zögern sie den Zusammenbruch der Mauer hinaus. Dann bringen sie Reisig und anderes brennendes Material hinein. Schließlich setzen sie ihre Truppen in Bereitschaft und zünden das Werk an. Sobald die Holzstützen und Verschalungen verbrannt sind, bricht die Mauer plötzlich zusammen und wird so zum Sturmangriff geöffnet.«

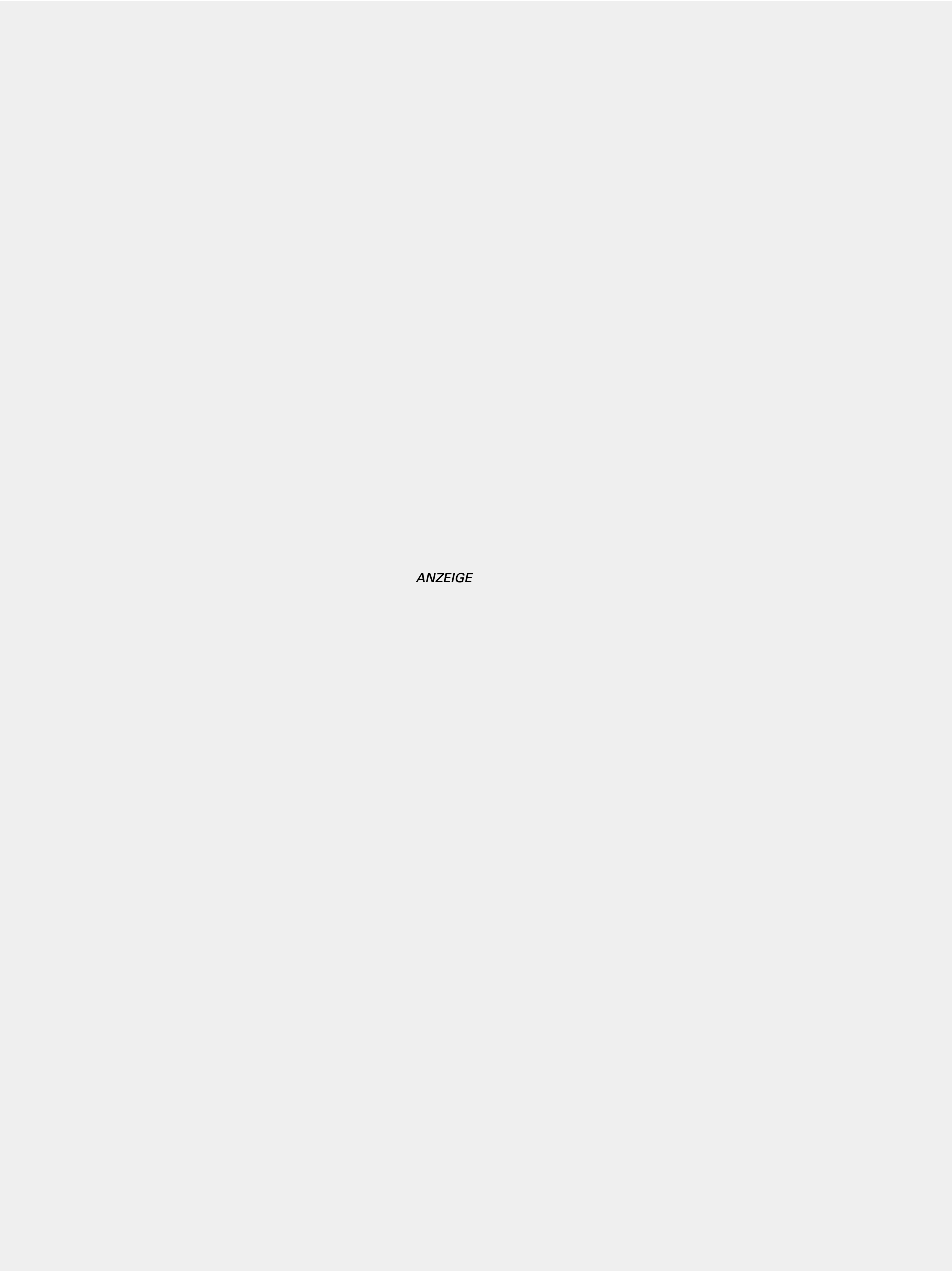
Wie die Ausgrabungen in Dura Europos belegen, sahen die Römer dem keineswegs tatenlos zu, sondern trieben ihrerseits eine Gegenmine im Bereich eines der Wehrtürme vor. Diese Form der Konterattacke hatte bereits der griechische Belagerungsexperte Aineas Taktikos (4. Jh. v. Chr.) vorgeschlagen. Doch diesmal war das Unternehmen nicht von Erfolg gekrönt. Skelette und Ausrüstungsgegenstände im Tunnel sprechen eine deutliche Sprache. Offenbar war es unter Tage zum Kampf gekommen, hastig mussten sich die Römer zurückziehen. Sie konnten nicht einmal die Verwundeten bergen und blockierten eilig ihren eigenen Tunnel. Markus Gschwind malt ein dramatisches Bild vom letzten Schlag gegen Dura Europos: »Als die Sasaniden Feuer an die Holzstützen legten, brach das Fundament einfach weg. Zwei Seiten des Turms und ein Stück der angrenzenden Mauer sackten mit einem Schlag um mehr als einen Meter ab.«

Auf Dura Europos folgten die Lager von Qreiye und Magdala, die kurz darauf von Shapurs Kriegern erobert wurden. Wahrscheinlich ist Qreiye mit Birta Arupan zu identifizieren, dessen Eroberung in Shapurs Tatenbericht, den »Res gestae Divi Saporis«, erwähnt wird. Aber es kam noch schlimmer. 260 n. Chr. geriet Kaiser Valerian (253–260 n. Chr.) in persische Gefangenschaft, in der er Jahre später auch starb – eine Schmach, die in der Geschichte des Imperiums ihresgleichen suchte. Shapur I. ließ seine Siege über Rom an mehreren Orten seines Reichs auf überlebensgroßen Triumphreliefs verewigen. Majestätisch und für aller Augen sichtbar, führten sie gleich drei römische Kaiser in demütigender Weise vor: Gordian III., unter dem Pferd Shapurs liegend, Philippus Arabs, kniend, und Valerian, wie ein Untertan »ergriffen« (siehe Bild S. 27).

Roms Image als Ordnungsmacht im Osten hatte schweren Schaden genommen. Als direkte Folge dieses Ansehensverlusts fiel 272 n. Chr. die syrische Karawanenstadt Palmyra unter ihrer Königin Zenobia von Rom ab. Doch sie hatte den Zeitpunkt schlecht gewählt: Im selben Jahr verstarb der Sasanidenkönig und Rom bekam wieder Luft. Sein neuer Kaiser Aurelian (270–275 n. Chr.) beendete Zenobias Eskapade und verlegte eine Le- ▷

◀ **Der hohen Durchschlagskraft persischer Reiterbögen hatte das römische Militär wenig entgegenzusetzen.**

Aus urheberrechtlichen Gründen können wir Ihnen die Bilder leider nicht online zeigen.


ANZEIGE

Der Euphrat bei Halabiye im heutigen Syrien: Am rechten Flussufer erhob sich majestätisch die von Kaiser Justinian errichtete Festung – steingewordene Manifestation des römischen Selbstbehauptungswillens im Abwehrkampf gegen die Sasaniden.

THEODOR KISSEL

▷ gion nach Palmyra, ein erster Schritt zur Stabilisierung der Lage an der Ostgrenze.

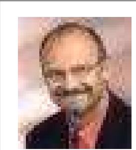
Eine umfassende Neuordnung unternahm jedoch erst Kaiser Diokletian (284–305 n. Chr.), dem es erstmals wieder gelang, durch kluge Politik Ruhe und Ordnung in das Reich zu bringen. Unter anderem stellte er auch die Grenzverteidigung im Osten auf eine neue Grundlage: Staatliche Waffenfabriken im Hinterland versorgten ein gestaffeltes System aus vorgeschobenen Kontrollposten und rückwärtigen Kastellen. Diokletian wollte die Grenze nicht mehr hermetisch abriegeln, sondern Invasoren früh genug erkennen, um rasch Truppenkontingente zu verlegen. Das strategische Rückgrat des neuen Limes bildete deshalb die *Strata Diocletiana*, eine Militärstraße, die von Sura am Euphrat bis nach Damaskus führte.

Kompakte Burgen, mobile Truppen

In deren Nordabschnitt hat die Münchner Archäologin Michaela Konrad unlängst mehrere Kastelle freigelegt. Sämtliche Anlagen entsprachen einem neuen Kastelltyp, der seit Ende des 3. Jahrhunderts n. Chr. im Osten in Gebrauch kam, das *Quadriburgium* (siehe Bild S. 25). Schluss war mit langen Mauern, nach innen gerichteten Türmen und Reihen freistehender Baracken, das spätantike Fort hatte einen trapezartigen Grundriss mit markant hervortretenden Eckbastionen, gegen Beschuss gesicherte Kasematten, wehrgangbesetzte Wälle (Kurtinen) und eine sehr breite Umfassungsmauer. Die kompakten, aus ungebrannten Lehmziegeln errichteten Bastionen boten Angreifern weniger Angriffsfläche, die Mannschaftsunterkünfte lagen nicht mehr in der Schusslinie persischer Bogenschützen. Ferner ließen sich von aus der Mauer nach außen tretenden Ecktürmen Unterminierungen effektiver bekämpfen, da man von dort aus die feindlichen Stollenarbeiter beim Eintritt und beim Verlassen in die Mine mit Pfeilen beschießen konnte.

Mit der Verkleinerung der Wehranlagen ging auch eine Reduktion der Truppenstärke einher. Legionen umfassten jetzt nur noch 1000 statt 6000 Mann, die Kavallerie- und Infanterieeinheiten entsprechend nur noch 120 anstatt 500 Soldaten. Gleichzeitig erhöhte sich damit die Zahl der Legionen, sodass Diokletian sie in ein mobiles Bewegungsheer *(comitatenses)* und fest stationierte Grenztruppen *(limitanei)* aufteilen konnte. Zudem ließ er die Ausrüstung modernisieren: Um sich gegen die persischen Reiter mit ihren langen Stoßlanzen besser zur Wehr setzen zu können, verwendete man statt des Kurzschwerts *(gladius)* das Langschwert *(spatha)*. Damit vermochte Rom den rüstungstechnischen Vorsprung seines östlichen Gegenspielers nahezu auszugleichen und den sasanidischen Reiterheeren auf Dauer Paroli zu bieten. Dieses militärische Patt blieb bis in die Spätantike erhalten, als die oströmischen Kaiser nunmehr von Konstantinopel aus, dem »Neuen Rom«, die Verteidigung ihrer Ostgrenze organisierten (siehe Bild oben). Allerdings mussten sie – wie Kaiser Justinian (Regierungszeit 527–565 n. Chr.) den Status quo immer wieder mit hohen Tributzahlungen erkaufen. Erst 642 n. Chr. endete das Ringen zwischen Rom und dem Sasanidenreich – als mit dem Sieg des Islam in dieser Region eine neue Zeit anbrach. ◁

AUTOR UND LITERATURHINWEISE



Der Mainzer Althistoriker **Theodor Kissel** erkundete die antike Krisenregion am Euphrat vor Ort in der syrischen Wüste.

Qreiye/Ayyash. Ein römisches Kastell am Euphrat. Von Markus Gschwind in: Zwischen Kulturen und Kontinenten. 175 Jahre Forschung am Deutschen Archäologischen Institut. Druckhaus Koethen GmbH, Berlin 2004, S. 160

Roms Limes im Orient. Von Andreas Oettel in: Schliemanns Erben. Von den Römern im Orient zur Goldstraße der Inka. Hoffman und Campe, Hamburg 2003, S. 74

Römische Militärposten der Severerzeit am Unteren Chabur. Von Andreas Luther in: Göttinger Forum für Altertumswissenschaft, Heft 5, 2002, S. 1

Grundzüge der Geschichte des Sasanidischen Reiches. Von Klaus Schippmann. Wissenschaftliche Buchgesellschaft, Darmstadt 1990



Heilsames Handkolorieren

»Photographie … wurde während des letzten Jahrzehnts als einer der heilsamsten Faktoren auf dem Gebiet der Beschäftigungstherapie anerkannt. Als dann die Verwundeten heimkehrten und die Hospitäler füllten, begann die Gruppe der VSP (Volunteer Service Photographers Inc.) sich mit den körperlich und geistig Kranken zu befassen … Sie unterrichten die Patienten und helfen ihnen in der Dunkelkammer … Handkolorierung fertiger Kopien ist ein besonders wichtiges Gebiet der Beschäftigungstherapie, da sie die Koordinierung von Hand und Auge fördert und große Konzentration verlangt. Die medizinische Wissenschaft erkannte die heilsame Wirkung des Handkolorierens und empfiehlt sie in vielen langwierigen Fällen.« *(Photo-Magazin, Heft 11, S. 54, November 1955)*



◀ Fotografie als Therapie – ehrenamtliche Helfer unterstützen Kriegsversehrte.

Kreiseltest für Alkoholsünder

»Für die täglich Praxis habe ich … die sogenannte Dreh-Nystagmusprobe entwickelt. … Die Untersuchungsperson wird stehend in 10 Sekunden 5mal gedreht, dann muß sie bei plötzlichem Anhalten den in 30 cm Abstand zur Augenhöhe gehaltenen Zeigefinger des untersuchenden Arztes fixieren … Bei alkoholbeeinflußten Personen zeigt sich … ein mehr oder weniger starkes rhythmisches Augenrucken, das in den Fällen mittlerer und starker Alkoholbeeinflussung 15, 20 und mehr Sekunden anhält … Wenn … eine Person eine Alkoholkonzentration im Blut von schon etwa 0,6 Promille aufweist, zeigt sie in jedem Falle einen positiven Ausfall.« *(Die Umschau, 55. Jg, Heft 22, S. 682, November 1955)*

Antiproton nachgewiesen

»Nunmehr ist es … der Universität Berkeley gelungen die von Oppenheimer aufgestellte Hypothese eines Antiprotons … zu bestätigen … Hierbei wurden im Bevatron Protonen bis auf die bisher noch nie eingesetzte Energie von 6,2 Milliarden Elektronenvolt beschleunigt und auf eine im Innern befindliche Kupferplatte gerichtet … Mit Hilfe eines … Filtersystems konnten … die Vorgänge erfaßt werden, die sich beim Zusammentreffen eines derart beschleunigten Protons mit einem Neutron abspielen: dabei bleiben einmal die beiden zusammengetroffenen Partikel – Proton und Neutron – erhalten, außerdem entstehen aber zwei neue Partikel, von denen eines wieder ein Proton ist, so daß das andere nur ein negatives Proton oder Antiproton sein kann.« *(Chemiker Zeitung, 79. Jg, Nr. 21, S. 747, November 1955*

Bildfax mit Pixeltechnik

»Die Photographie wird auf einem durchsichtigen Glaszylinder angebracht, der sich langsam dreht und dabei immer weiter rückt … Im Inneren des Glaszylinders befindet sich ein eigenartiger Selen-Körper … Trifft nun der Lichtstrahl auf dem Zylinder ein dunkles Bildquadrat, so wird er selbst verdunkelt, und das von ihm getroffene Selen läßt nur wenig Strom in die Leitung fließen, … der Strom wird also, je nachdem die einzelnen Quadrate des Bildes bald heller oder dunkler sind, bald stärker, bald schwächer … Durch ihn wird eine Glühlampe … im Inneren eines zweiten Glaszylinders … auf welchem ein lichtempfindlicher Film aufgewickelt ist … , bald heller, bald dunkler leuchten, und ein von ihr auf den Film fallender Lichtstrahl wird bald dunklere, bald hellere Partien auf den Film hervorbringen, so daß auf diesem nach und nach dasselbe Bild entsteht.« *(Hannoversches Gewerbeblatt, Nr. 21, S. 145, November 1905)*

Keime aus Gräbern?

»Dr. Klein hat … eine Untersuchung von Mikroben begrabener Tierkörper vorgenommen und ist zu folgenden Ergebnissen gelangt: In der Erde am wenigsten widerstandsfähig ist der Schwindsuchterreger … Bösartiger sind allerdings einige andere Krankheitserreger, so der Milzbrandkeim, dessen Sporen sich jahrelang im Erdboden vermehrungsfähig erhalten; auch der Starrkrampferreger bleibt im Boden lange am Leben.« *(Beilage zur Allgemeinen Zeitung, Nr. 261, S. 279, November 1905)*

Luft zum Leben



»Das von uns unter dem Schutzworte ›Hydrobion‹ gebrachte Sauerstoffzuführungs- und Imprägnierungsverfahren ist geeignet, die Frage der Fischbeförderung definitiv zu lösen … Es bedeutet eine aus Mannesmannrohrstahl nahtlos angefertigte 2,5 Liter-Flasche für die Aufnahme von ungefähr 300 Liter komprimiertem Sauerstoff. Wird der … Hahn aufgedreht, so strömt Sauerstoff … in den auf dem Boden des Transportgefässes liegenden Sauerstoffzerteiler. Letzterer, durch ein Drahtnetz vor Beschädigungen gesichert, ist ein aus poröser Kunststeinmasse hergestellter hohler zylindrischer Diaphragmakörper, aus dessen Wandungen der Sauerstoff in Form eines ungemein zarten, nebelfeinen Bläschenschleiers in das Wasser übertritt.« *(Die Umschau, 9. Jg, Nr. 47, S. 928, November 1905)*



▶ Hydrobion für den Lebendtransport von Fischen

SLIM FILMS

Vom Blitz getroffen

Überrascht stellen Forscher fest: Blitze senden auch Röntgen- und Gammastrahlung aus. Die Physik dieses Naturphänomens erweist sich als noch komplexer und rätselhafter als gedacht.

Diesen Artikel können Sie auch anhören, siehe: www.spektrum.de/audio

Von Joseph R. Dwyer

Blitze sind eine besonders dramatische Begleiterscheinung schlechten Wetters. Manchmal schlagen sie sogar ohne Vorwarnung aus heiterem Himmel zu. In Zentralflorida, wo ich wohne, sind Sommergewitter etwas so Alltägliches, dass viele Menschen den Nachmittag lieber nicht im Freien verbringen, aus Angst, vom Blitz erschlagen zu werden.

Jeden Tag durchzucken ungefähr vier Millionen Blitze die Atmosphäre. Gleichwohl ist die Ursache dieses Phänomens noch nicht verstanden. Dass Benjamin Franklin das Rätsel im Jahr 1752 mit seinem berühmten Drachenexperiment gelöst habe, ist ein Irrtum. Obwohl Franklin Blitze als elektrisches Phänomen erkannte, suchen Wissenschaftler bis heute nach einer Erklärung dafür, wie bei einem Gewitter elektrische Ladungen erzeugt und Blitze ausgelöst werden. Manche Physiker vermuten einen Zusammenhang mit der kosmischen Strahlung – hochenergetischen Teilchenströmen, die aus dem Weltraum auf die Erde gelangen und in der Atmosphäre Kaskaden schneller Elektronen freisetzen.

Seit Kurzem verfolgen Wissenschaftler einen neuen Ansatz: Sie untersuchen die im Zusammenhang mit Blitzen auftretende Röntgenstrahlung. In den letzten Jahren hat unsere Arbeitsgruppe sowohl natürliche wie auch durch Raketen künstlich herbeigeführte Blitze vermessen. Die Ergebnisse lassen darauf schließen, dass sich die Entladungen ihre gezackten Leitkanäle durch stoßartige Aussendung hochenergetischer Elektronen bahnen. Ungeklärt ist allerdings, wie dabei die Elektronen beschleunigt werden. Um das herauszufinden, bauen wir derzeit in Florida eine Messvorrichtung mit mehreren Röntgendetektoren.

In mancherlei Hinsicht ähneln Blitze großen Funken. Betrachten wir eine normale Funkenentladung, wie wir sie beim Berühren einer Türklinke erleben, nachdem wir über Teppichboden gegangen sind. Durch die Reibung unserer Schuhe lösen wir Elektronen aus dem Teppich und sammeln elektrische Ladung an, weshalb zwischen uns und anderen Gegenständen im Raum ein elektrostatisches Feld entsteht. Für kleine Feld- ▷



Eine natürliche Röntgenquelle: Jüngste Untersuchungen zeigen, dass Blitze Ausbrüche von Röntgenstrahlung erzeugen, während sie sich ihre gezackten Leitkanäle durch die Atmosphäre bahnen. Die Energie der Röntgenquanten beträgt bis zu 250000 Elektronenvolt, ungefähr das Doppelte wie bei einer Röntgenaufnahme der Lunge.

stärken ist Luft ein guter Isolator – die Elektronen lagern sich schneller an Sauerstoffatome an, als sie durch Zusammenstöße herausgeschlagen werden. Es kann somit kein nennenswerter Strom fließen. Während sich unsere Hand der Türklinke nähert, wird das elektrische Feld jedoch lokal verstärkt. Überschreitet es eine kritische Feldstärke von ungefähr drei Millionen Volt pro Meter, die so genannte Durchbruchfeldstärke, wird die Luft leitend und es kommt zu einer Entladung. Durch den Raum zwischen Hand und Türklinke fließt Strom.

Die elektrische Aufladung während eines Gewitters weist gewisse Ähnlichkeiten mit unserem Beispiel auf. Die Rolle der Schuhe auf dem Teppich übernehmen vermutlich Graupel – verklumpte Schneekristalle –, die im Innern der Gewitterwolke durch ein Gemenge aus Eiskristallen und Wassertropfen hindurchfallen (siehe Spektrum der Wissenschaft 1/1989, S. 80). Durch Zusammenstöße dieser Partikel können Elektronen aus ihnen herausgelöst werden, wodurch sie sich elektrisch aufladen. Die Trennung der positiven und negativen Ladungen durch Aufwind und Schwerkraft erzeugt das elektrische Feld. Versuchen wir jedoch, die Türklinkenanalogie noch einen Schritt weiterzuführen, begegnen wir einem gravierenden Problem: Jahrzehnte der ballon-, flugzeug- und raketengestützten Messungen haben gezeigt, dass Feldstärken von mehr als 200 000 Volt pro Meter im Innern von Gewitterwolken extrem selten sind. Dies liegt weit unter dem Wert, der für den Durchschlag in Luft notwendig wäre.

Bis vor Kurzem haben die Wissenschaftler diesen Befund vor allem auf zweierlei Weise erklärt. Zum einen wäre es durchaus möglich, dass in relativ kleinen Raumgebieten im Innern von Gewitterwolken stärkere elektrische Felder



auftreten; wegen ihrer räumlichen Begrenzung wären sie aber nur schwer zu messen. Obwohl diese Hypothese durch die bisherigen Beobachtungsdaten nicht ausgeschlossen werden kann, ist sie doch insgesamt wenig befriedigend, da die ursprüngliche Frage nur durch eine andere ersetzt wird, nämlich: Wie erzeugen Gewitterwolken in solch kleinen Raumgebieten starke elektrische Felder?

Ein neuer Mechanismus der Blitzentladung

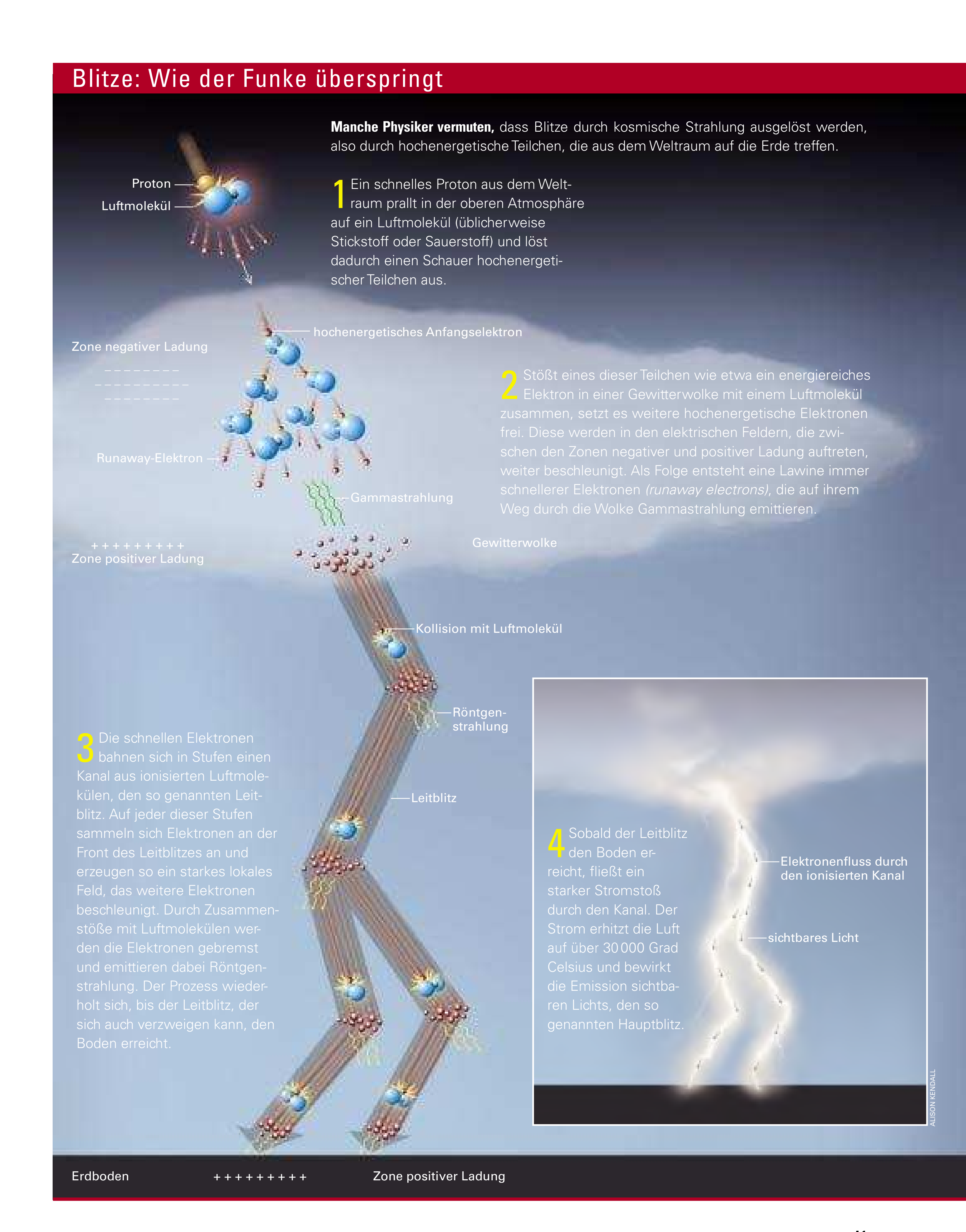
Der zweite Erklärungsansatz stützt sich auf Laborexperimente, die zeigen, dass die für eine Entladung benötigte elektrische Feldstärke erheblich geringer ist, wenn Regentropfen oder Eispartikel vorhanden sind, wie es ja im Innern von Gewitterwolken der Fall ist. Leider kann dies nur einen Teil der Diskrepanz erklären; für die Herbeiführung einer konventionellen Entladung scheinen die Felder in Gewitterwolken noch immer zu schwach zu sein.

Ungeklärt ist auch die Frage, wie sich Blitze über viele Kilometer durch die Luft fortpflanzen. Der Prozess beginnt mit der Bildung eines so genannten Leitblitzes, eines heißen Kanals, in dem die Luft ionisiert wird und Ladung über weite Entfernungen hinweg transportiert werden kann (siehe Kasten rechts). Interessanterweise bewegt sich dieser Leitblitz nicht kontinuierlich nach unten, sondern in einer Abfolge diskreter Stufen. Wie dies genau funktioniert, ist noch nicht vollständig verstanden, denn die Bemühungen um eine Modellierung dieser Prozesse waren nicht gänzlich erfolgreich. Mir und vielen Kollegen stellt sich deshalb die Frage, ob wir vielleicht einen wesentlichen Aspekt übersehen haben. Möglicherweise ist es ja falsch, Blitze als rein konventionelle Entladung wie den Funkenüberschlag an einer Türklinke zu betrachten. Wie sich herausgestellt hat, gibt es noch eine ungewöhnlichere Art des elektrischen Durchschlags, die Runaway-Entladung (englisch: *runaway breakdown*).

In einer konventionellen Entladung bewegen sich die Elektronen relativ langsam, da sie permanent mit Luftmolekülen zusammenprallen. Diese Stöße bedingen eine Art Widerstand, der umso größer wird, je schneller das Elektron ist. Für Geschwindigkeiten oberhalb von sechs Millionen Meter pro Sekunde (etwa zwei Prozent der Lichtgeschwindigkeit) sinkt der Widerstand jedoch mit weiter zunehmender Elektronengeschwindigkeit. Ein hochenergetisches Elektron, das in einem starken elektrischen Feld beschleunigt wird, kann deshalb noch schneller werden, was wiederum den Widerstand weiter reduziert, und so weiter. Solche im Englischen *runaway electrons* genannten Elektronen können fast Lichtgeschwindigkeit erreichen und lösen mit ihren extrem hohen Energien die Runaway-Entladung aus. (Im Deutschen könnte man

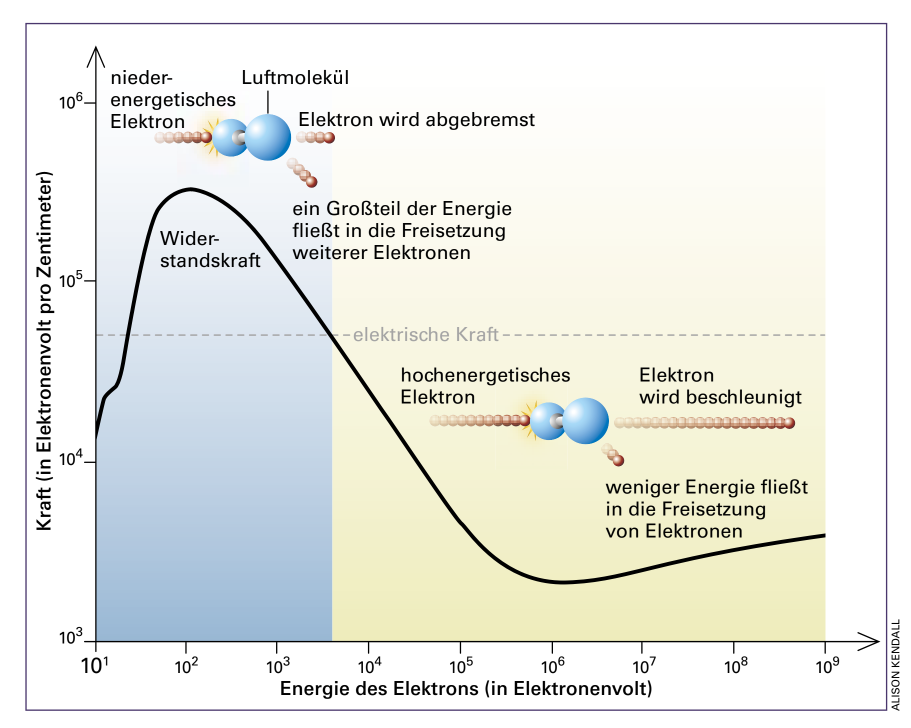
IN KÜRZE

- Blitze geben nach wie vor Rätsel auf: Wie eine **elektrische Entladung** auf konventionellem Wege zu Stande kommen soll, ist unklar, denn die elektrischen Felder im Innern von Gewitterwolken sind dafür anscheinend nicht stark genug.
- Der Nachweis von Röntgenstrahlung, die kurz vor der Hauptentladung emittiert wird, erhärtet die Vermutung, dass Blitze **Elektronen auf fast Lichtgeschwindigkeit** beschleunigen können. Dieses Phänomen wird als Runaway-Entladung (englisch: *runaway breakdown*) bezeichnet.
- Forscher installieren derzeit eine Versuchsanordnung mit Röntgendetektoren in Florida, um die Prozesse zu untersuchen, die zur **Auslösung und Fortpflanzung von Blitzen** in der Atmosphäre führen.


Blitze: Wie der Funke überspringt
Manche Physiker vermuten, dass Blitze durch kosmische Strahlung ausgelöst werden, also durch hochenergetische Teilchen, die aus dem Weltraum auf die Erde treffen.
Proton
Luftmolekül
1 Ein schnelles Proton aus dem Weltraum prallt in der oberen Atmosphäre auf ein Luftmolekül (üblicherweise Stickstoff oder Sauerstoff) und löst dadurch einen Schauer hochenergetischer Teilchen aus.
hochenergetisches Anfangselektron
Zone negativer Ladung
2 Stößt eines dieser Teilchen wie etwa ein energiereiches Elektron in einer Gewitterwolke mit einem Luftmolekül zusammen, setzt es weitere hochenergetische Elektronen frei. Diese werden in den elektrischen Feldern, die zwischen den Zonen negativer und positiver Ladung auftreten, weiter beschleunigt. Als Folge entsteht eine Lawine immer schnellerer Elektronen *(runaway electrons)*, die auf ihrem Weg durch die Wolke Gammastrahlung emittieren.
Runaway-Elektron
Gammastrahlung
Gewitterwolke
+ + + + + + + + +
Zone positiver Ladung
Kollision mit Luftmolekül
Röntgen-strahlung
3 Die schnellen Elektronen bahnen sich in Stufen einen Kanal aus ionisierten Luftmolekülen, den so genannten Leitblitz. Auf jeder dieser Stufen sammeln sich Elektronen an der Front des Leitblitzes an und erzeugen so ein starkes lokales Feld, das weitere Elektronen beschleunigt. Durch Zusammenstöße mit Luftmolekülen werden die Elektronen gebremst und emittieren dabei Röntgenstrahlung. Der Prozess wiederholt sich, bis der Leitblitz, der sich auch verzweigen kann, den Boden erreicht.
Leitblitz
4 Sobald der Leitblitz den Boden erreicht, fließt ein starker Stromstoß durch den Kanal. Der Strom erhitzt die Luft auf über 30 000 Grad Celsius und bewirkt die Emission sichtbaren Lichts, den so genannten Hauptblitz.
Elektronenfluss durch den ionisierten Kanal
sichtbares Licht
ALISON KENDALL
Erdboden
+ + + + + + + + +
Zone positiver Ladung

▷ diese Elektronen in Analogie zu einem Radrennen, bei dem sich die Spitzengruppe immer weiter vom Feld absetzt, als Ausreißerelektronen bezeichnen.)

Auf Grund dieser ungewöhnlichen Eigenschaft des Luftwiderstands werden also Elektronen oberhalb einer gewissen Schwellenenergie in einem ausreichend starken elektrischen Feld immer weiter beschleunigt, während Elektronen unterhalb dieses Schwellenwerts Energie verlieren und langsamer werden (siehe Grafik rechts). Die Runaway-Entladung setzt somit eine Startpopulation von Elektronen hoher Anfangsenergie voraus. Der schottische Physiker C. T. R. Wilson vermutete 1925 als Erster, dass der Zerfall radioaktiver Isotope oder der Zusammenstoß von Teilchen kosmischer Strahlung mit Luftmolekülen hochenergetische Elektronen erzeugen könnte, die durch die elektrischen Felder im Innern von Gewitterwolken immer weiter beschleunigt würden. Allerdings reicht die gemäß Wilsons Modell erzeugte Anzahl von Ausreißerelektronen nicht aus, um Blitze auslösen zu können.



Hochenergetische Elektronen bahnen den Weg für den Blitz. Sie gewinnen durch das elektrische Feld mehr Energie, als sie durch den Luftwiderstand verlieren, sodass sie immer schneller werden. Langsame Elektronen hingegen verspüren einen viel höheren Luftwiderstand und werden weiter abgebremst.

Relativistische Ausreißerelektronen

1961 vermutete Alexander V. Gurevich vom Lebedew-Institut für Physik in Moskau einen anderen Mechanismus für die Entstehung von Ausreißerelektronen. Er wies nach, dass von den allgegenwärtig vorhandenen freien Elektronen geringer Energie eine große Anzahl durch sehr starke elektrische Felder direkt auf hohe Energien beschleunigt werden kann. Damit vermied er Wilsons Problem einer unzureichenden Menge hochenergetischer Anfangselektronen. Der zu Grunde liegende Mechanismus ist simpel: Das elektrische Feld ist so stark, dass manche niederenergetischen Elektronen sehr rasch auf Geschwindigkeiten oberhalb des Schwellenwerts beschleunigt werden, wodurch sie von selbst immer schneller werden oder »durchgehen« können, wie es der englische Begriff *run away* ausdrückt. Allerdings setzt dieser Mechanismus ein elektrisches Feld voraus, das ungefähr zehn Mal größer ist als das für eine konventionelle Entladung benötigte Feld, welches wiederum weitaus größer ist als die tatsächlich in Gewitterwolken beobachteten elektrischen Felder. Brachte Gurevichs Idee also wirklich etwas?

Der Lösung kam man schließlich 1992 näher. Gemeinsam mit Gennady M. Milikh von der Universität von Maryland in College Park und Robert Roussel-Dupré vom Los-Alamos-Nationallaboratorium entwarf Gurevich das so genannte RREA-Modell *(Relativistic Runaway Electron Avalanche)*, das eine relativistische Lawine aus Ausreißerelektronen betrachtete. In diesem Szenario erzeugen die Elektronen selbst durch heftige Zusammenstöße mit Luftmolekülen weitere energiereiche Elektronen, die ihrerseits mit Luftmolekülen zusammenprallen und noch mehr hochenergetische Elektronen erzeugen. Das Resultat ist eine Lawine stark beschleunigter Elektronen, die mit der Zeit und der Entfernung exponentiell anwächst. Da dieser Prozess sogar von einem einzigen energiereichen Anfangselektron angestoßen werden kann, reichen die allgegenwärtig stattfindenden radioaktiven Zerfälle und Kollisionen der kosmischen Höhenstrahlung mit Luftmolekülen völlig aus, eine Lawine von Ausreißerelektronen in Gang zu setzen. Und solange sich die Lawine in einem starken elektrischen Feld bewegt, wird sie immer weiter anwachsen, bis sie schließlich zu einer Runaway-Entladung führt.

Im Gegensatz zur älteren Vermutung Gurevichs kommt dieses neue Modell mit einem elektrischen Feld aus, das nur etwa ein Zehntel der für eine konventionelle Entladung in trockener Luft benötigte Feldstärke aufweist. In den für Gewitterwolken typischen Höhen, in denen die Luftdichte viel geringer ist als auf Meeresniveau, beträgt das für diese Art der Runaway-Entladung benötigte elektrische Feld ungefähr 150000 Volt pro Meter, was durchaus innerhalb der in Gewitterwolken gemessenen Werte liegt. Tatsächlich ist das wohl kein Zufall, denn stärkere Felder sollten meinen Berechnungen zufolge durch eine Runaway-Entladung zusammenbrechen.

In einer normalen Entladung sind alle Elektronen energiearm und bewegen sich relativ langsam, sodass die durch den Funken freigesetzte elektromagnetische Strahlung nicht über den ultravioletten Bereich des Spektrums hinausgeht. In einer Runaway-Entladung hingegen ionisieren die stark beschleunigten Elektronen sehr viele Luftmoleküle und erzeugen über den Bremsstrahlungseffekt hochenergetische Röntgen- und Gammastrahlung. Eine Möglichkeit, Runaway-Entladungen nachzuweisen, ist darum die Suche nach Röntgenstrahlung.

Angeregt zunächst von Wilsons Vermutung und später von Gurevichs Arbeit haben Wissenschaftler seit den 1930er Jahren versucht, die von Gewittern und Blitzen ausgehende Röntgenstrahlung nachzuweisen. Solche Messungen sind sehr schwierig durchzuführen und haben bis vor Kurzem überwiegend unklare Ergebnisse geliefert. Eine Schwierigkeit

liegt darin, dass Röntgenstrahlen keine weiten Strecken in der Atmosphäre zurücklegen, sondern für gewöhnlich schon nach wenigen hundert Metern absorbiert werden. Ein weiteres Problem ist der für Gewitter typische hohe elektromagnetische Rauschpegel. Insbesondere emittieren Blitze Radiostrahlung, die sich noch in vielen Kilometern Entfernung in Mittel- und Langwellenradios als störendes Knistern bemerkbar machen. Der Nachweis von Röntgenstrahlung erfordert das Aufzeichnen schwacher elektrischer Signale. Solche Messungen in der Nähe von Blitzen durchzuführen gleicht dem Versuch, eine Unterhaltung in einer geräuschvollen Kneipe belauschen zu wollen. Wegen dieser Schwierigkeit begegnete man vielen der anfänglichen Ergebnisse mit Skepsis.

Die Situation änderte sich in den 1980er Jahren, als ein Team um George K. Parks und Michael P. McCarthy von der Universität von Washington in Seattle mit Flugzeugen Messungen in Gewitterzonen durchführten. Später ließ Kenneth B. Eack, inzwischen am New-Mexico-Institut für Bergbau und Technologie (NMT) in Socorro, mit seinen Mitarbeitern Messballons in Gewitterwolken aufsteigen. Diese Beobachtungen lieferten überzeugende Belege, dass es bei Gewittern gelegentlich zu heftigen Ausbrüchen von Röntgenstrahlung kommt. Die Quelle der Röntgenstrahlung konnte zwar nicht lokalisiert werden, aber sie schien mit den starken elektrischen Feldern in den Gewitterwolken in Verbindung zu stehen. Interessanterweise setzte die Röntgenstrahlung manchmal unmittelbar vor dem beobachteten Blitz ein und endete mit dem Aufflackern des sichtbaren Blitzstrahls – möglicherweise weil dieser die zur Erzeugung einer Runaway-Entladung erforderlichen elektrischen Felder zusammenbrechen ließ.

Außer der Runaway-Entladung kennen die Forscher keinen Mechanismus, der eine solch intensive Röntgenstrahlung in unserer Atmosphäre erzeugen könnte. Andere mit Blitzen verknüpfte Phänomene kommen für die Emission nicht in Frage; denn obwohl sich die Luft im Blitzkanal bis auf 30 000 Grad Celsius erhitzen kann – was dem Fünffachen der Temperatur an der Sonnenoberfläche entspricht –, reicht dies bei Weitem nicht aus, um auf thermischem Weg energiereiche Photonen im Röntgenbereich abzustrahlen.

Im Jahr 2001 konnte schließlich eine direkte Verbindung zwischen Röntgenstrahlen und Blitzen hergestellt werden: Charles B. Moore und seine Kollegen vom NMT berichteten, dass sie hochenergetische Strahlung, vermutlich Röntgenstrahlung, im Zusammenhang mit mehreren natürlichen Blitzeinschlägen auf einer hohen Bergspitze registriert hatten. Im Gegensatz zu früheren flugzeug- und ballongestützten Beobachtungen hatte es den Anschein, als ob diese energiereiche Strahlung von den Blitzen selbst und nicht von den großräumigen elektrischen Feldern in den Gewitterwolken ausging. Des Weiteren schienen die Emissionen in der ersten Phase des Blitzes aufzutreten, in der sich der Leitblitz von den Wolken zum Erdboden vorarbeitet – was eine völlig neuartige Beobachtung darstellte.

Wie man Blitze ins Labor holt

Das war der Stand, als ich mich mit diesem Forschungsgebiet zu beschäftigen begann. Das von Gurevich, Milikh und Roussel-Dupré vorgeschlagene Modell der Runaway-Entladung hatte meine Neugier geweckt. Ich beschloss, die häufigen Gewitter vor meiner eigenen Haustür systematisch zu untersuchen und so herauszufinden, ob Blitze tatsächlich Röntgenstrahlung emittieren.

Das Florida-Institut für Technologie, an dem ich arbeite, betreibt mit der Universität von Florida in Camp Blanding ein Blitzforschungszentrum, das International Center for Lightning Research and Testing (ICLRT). Dort stellte unsere Arbeitsgruppe im Jahr 2002 eine Messapparatur auf. Um Störsignale zu reduzieren, brachten wir die empfindlichen Röntgendetektoren in schweren Aluminiumbehältern unter, deren Konstruktion neben Feuchtigkeit und Licht auch störende Radiostrahlung abschirmte.

Wenn ein Gewitter über dem ICLRT aufzieht und das elektrische Feld auf dem Boden mehrere tausend Volt pro Meter erreicht, wird von einem Holzturm aus eine ein Meter lange Rakete in die Höhe geschossen. An ihr ist ein dünner, mit Kevlar ummantelter Kupferdraht befestigt, der sich von einer Rolle abspult. Das zweite Ende des Drahts ist mit dem Erdboden verbunden. Während die Rakete bis zu 700 Meter hoch aufsteigt, erhöht der geerdete Draht das elektrische Feld an ihrer Spitze, wodurch sich ein aufwärts gerichteter Leitblitz ausbildet, der schließlich in die Gewitterwolke mündet. Elektrischer Strom, der vom Boden in den Leitblitz aufsteigt, lässt den Draht rasch verdampfen. Bei ungefähr der Hälfte aller Raketenabschüsse wird auf diese Weise ein künstlicher Blitz ausgelöst, der für gewöhnlich in die Raketenabschussrampe einschlägt.

Natürliche wie auch künstlich erzeugte Blitze bestehen in der Regel aus mehreren aufeinander folgenden Einzelentladungen. Bei künstlichen Blitzen beginnt jeder Blitzstrahl als eine abwärts gerichtete Ladungssäule, die in Bodennähe mehr oder weniger dem Weg folgt, den die Rakete und der Auslösedraht vorgezeichnet haben. Dieser Leitblitz transportiert negative Ladung von der Wolke nach unten und ionisiert dabei den Blitzkanal. Sobald der Leitblitz den Boden erreicht, entsteht ein Kurzschluss und ein heftiger Strompuls, der Hauptblitz, fließt durch den Kanal. Dieser Strom erhitzt den Kanal und ist die Ursache für das sichtbare Licht, das wir wahrnehmen. Die anschließende rasche Ausdehnung der erhitzten Luft verursacht den Donner. Auf den Hauptblitz kann ein weiterer Leitblitz folgen, der den ganzen Prozess von Neuem in Gang setzt. Die rasch aufeinander folgenden Einzelentladungen sind der Grund für das Flackern des Blitzkanals.

In natürlichen Blitzen übernimmt ein in Stufen von der Wolke zum Boden vorwachsender Leitblitz die Rolle der Rakete bei der Erzeugung des ionisierten ▷

Blitze sind fünfmal so heiß wie die Sonne und bestehen aus mehreren aufeinander folgenden Einzelentladungen



WEATHERSTOCK, WARREN FAIDLEY

Blitzkanals. Die anschließenden Hauptblitze werden jedoch ähnlich wie bei den künstlich ausgelösten Blitzen eingeleitet. Der Vorteil bei der Untersuchung künstlich ausgelöster Blitze liegt darin, dass Ort und Zeitpunkt der Entladung genau kontrolliert werden können. Zudem kann das Experiment beliebig oft wiederholt werden. Dutzende von Blitzen werden jeden Sommer am ICLRT in Florida ausgelöst.

Ich muss zugeben, dass ich in Anbetracht der langen Vorgeschichte negativer oder unklarer Ergebnisse bei der Messung von Röntgenstrahlung in Gewittern keine allzu großen Erwartungen in unsere ersten Experimente setzte. Nachdem wir die ersten Messungen an künstlich ausgelösten Blitzen durchgeführt hatten, verging mehr als eine Woche, bis ich die Zeit fand, mit meinem Doktoranden Maher Al-Dayeh die Daten aus den Röntgendetektoren auszuwerten. Zu meiner großen Überraschung – und zur Überraschung fast der gesamten Fachwelt – entdeckten wir jedoch, dass künstlich ausgelöste Blitze fast jedes Mal große Mengen an Röntgenstrahlung produzieren. Die Röntgenblitze waren sogar so intensiv, dass sie unsere Instrumente vorübergehend blendeten.

Weitere Experimente im Jahr 2003 zeigten, dass die Röntgenstrahlung von den Leitblitzen emittiert wird, wobei möglicherweise die Hauptblitze zu Beginn ihrer Entstehung ebenfalls einen Beitrag leisten. Die Energie der Röntgenquanten beträgt bis zu 250 000 Elektronenvolt, ungefähr das Doppelte wie bei einer Röntgenaufnahme der Lunge. Die Strahlung wird außerdem nicht kontinuierlich ausgesandt, sondern in einer raschen Abfolge von Pulsen, die etwa eine Millisekunde auseinander liegen. Wenn Menschen einen Röntgenblick wie Superman hätten, würden sich Blitze unserem Auge völlig anders darstellen, als wir es gewohnt sind: Während sich der Leitblitz nach unten fortpflanzt, würden wir eine rasche Abfolge heller, von den Wolken zum Boden absteigender Blitze wahrnehmen. Diese Blitze würden mit zunehmender Annäherung an den Boden immer heftiger werden, bis sie schließlich in dem Augenblick, in dem die Hauptentladung einsetzt, mit einem heftigen Ausbruch enden. Obwohl der darauf folgende Strompuls im sichtbaren Licht hell aufleuchtet, wäre er im Wellenlängenbereich der Röntgenstrahlung unsichtbar.


WEATHERSTOCK, WARREN FAIDLEY

Hätten wir einen Röntgenblick wie Superman, würden sich Blitze unserem Auge völlig anders darstellen

Die Beobachtung von Röntgenstrahlung in der Nähe von Blitzen weist darauf hin, dass irgendeine Form der Runaway-Entladung daran beteiligt sein muss, die Elektronen so stark zu beschleunigen, dass Bremsstrahlung entsteht. Allerdings lassen sich unsere Messungen nicht sehr gut mit dem von Gurevich, Milikh und Roussel-Dupré entwickelten Lawinenmodell in Einklang bringen, das den Ansporn zu unseren Experimenten gab. Die Energien der von uns beobachteten Röntgenstrahlung liegen weit unter den Vorhersagen des Modells, während die Ausbrüche heftiger sind als erwartet. In der Tat legen die Ergebnisse die Vermutung nahe, dass die von den Leitblitzen erzeugten elektrischen Felder erheblich größer sind, als man bisher für möglich hielt. Ja, sie deuten sogar darauf hin, dass der in Blitzen wirksame Mechanismus eher dem von Gurevich 1961 vorgeschlagenen alten Modell der Runaway-Entladung entspricht, welches ein so hohes elektrisches Feld voraussetzte, sodass man es zunächst abtat. Auf welche Weise Blitze so starke elektrische Felder erzeugen können, ist zwar immer noch rätselhaft, aber weitere Röntgenbeobachtungen sollten hier wertvolle Hinweise liefern.

Seit Beginn unserer Messkampagne haben wir auch mehrere natürliche Blitzeinschläge am ICLRT beobachtet. Diese Daten zeigten sehr deutliche Röntgenemissionen in der Phase des Leitblitzes und bestätigten damit die früheren Messungen des NMT. Die rasch aufeinander folgenden Ausbrüche von Röntgenstrahlung trafen außerdem immer genau dann ein, wenn der Leitblitz sich wieder eine Stufe voranbewegte. Dies belegt, dass die Runaway-Entladung an dem Prozess der Festlegung der Blitzbahn und ihrer Verästelungen beteiligt ist. Ein ähnlicher Mechanismus ist in unseren Raketenexperimenten in der Phase der Leitblitze wirksam, welche die anschließenden Hauptblitze einleiten.

Die von natürlichen und künstlich ausgelösten Blitzen emittierte Röntgenstrahlung weist also große Ähnlichkeit auf. Alles deutet darauf hin, dass die Runaway-Entladung ein verbreitetes Phänomen in unserer Atmosphäre ist. Obwohl Luftmoleküle die Beschleunigung schneller Elektronen behindern, lassen unsere Beobachtungen darauf schließen, dass Runaway-Entladungen sogar in Bodennähe vorkommen, wo die Luftdichte am größten ist. (In der Tat stammte der größte Teil der beobachteten Röntgenstrahlung aus den untersten hundert Metern des Blitzkanals.) Somit dürfte die Runaway-Entladung in Gewitterwolkenhöhe noch weitaus häufiger sein.

Wie werden nun Blitze in den Gewitterwolken ausgelöst? In den vergangenen Jahren haben Wissenschaftler viel versprechende Modelle konstruiert, die zeigen, wie die von der kosmischen Strahlung in der Atmosphäre erzeugten Teilchenschauer den Prozess der Runaway-Entladung einleiten könnten. Da große Lawinen von Ausreißerelektronen bereits durch ein einziges energiereiches Ausgangselektron erzeugt werden können, muss die durch einen kosmischen Teilchenschauer mit Millionen von energiereichen Teilchen ausgelöste Entladung wirklich gewaltig sein. Eine solch heftige Entladung könnte zu einem Anwachsen des elektrischen Felds im vorderen Bereich der Elektronenlawine führen, da dort die elektrische Ladung stark zunimmt. Dies hat möglicherweise eine ähnliche Wirkung wie die Hand, die sich der Türklinke nähert: Das elektrische Feld wird vorübergehend so verstärkt, dass eine konventionelle elektrische Entladung stattfinden kann.

Einen eindrucksvollen Beleg für die Runaway-Entladung in Gewitterwolken lieferten die Experimente, die wir im Sommer 2004 am ICLRT durchführten. Beim letzten Raketenstart der Saison zeichneten drei im Abstand von 650 Me-



UNIVERSITÄT FLORIDA, LIGHTNING RESEARCH GROUP / MIT FRDL. GEN. VON J.R. DWYER ET AL., SCIENCE BD. 299, AAAS 2003

Künstlicher Blitz auf dem Versuchsgelände in Florida: Von einem Holzturm (kleines Bild) startet eine Rakete, die einen stromführenden Draht hinter sich her zieht. Dieser bildet einen leitenden Kanal für die Blitzentladung. Messinstrumente registrieren Energie und Intensität der dabei emittierten Röntgenstrahlung.

tern vom Blitzkanal befindliche Detektoren zufällig einen gewaltigen Ausbruch hochenergetischer Gammastrahlung auf. Die Energien der einzelnen Gammaquanten erreichten Werte von mehr als 10 Millionen Elektronenvolt, ungefähr das Vierzigfache der Energie der bisher bei Leitblitzen gemessenen Röntgenstrahlung. Wer sich Wissenschaftler als ruhige und bedächtige Menschen vorstellt, hätte uns erleben sollen, als die Messdaten auf unserem Monitor erschienen: Wir gerieten völlig aus dem Häuschen.

Unsere Messungen der Ströme im Blitzkanal, der elektrischen Felder sowie der Eigenschaften der Gammastrahlung ließen darauf schließen, dass die Quelle der Emission vermutlich in vielen Kilometern Höhe in der Gewitterwolke lag. Das hatten wir nun wirklich nicht erwartet, denn die Atmosphäre absorbiert Gammastrahlung sehr effektiv. Offenbar war die Strahlungsquelle jedoch so intensiv, dass manche der Gammaquanten zum Erdboden vordringen konnten. Diese Befunde lassen auf eine sehr heftige Runaway-Entladung in der Gewitterwolke schließen – verursacht durch einen Prozess, der mit der Auslösung künstlicher Blitze verbunden ist. Unsere Beobachtungen zeigen, dass es möglich ist, dieses Phänomen vom Erdboden aus zu untersuchen, was experimentell wesentlich einfacher zu bewerkstelligen ist, als Detektoren mit Flugzeugen oder Ballonen in die Höhe zu befördern. Zudem berichteten Wissenschaftler vor Kurzem, auch der Nasa-Sonnenforschungssatellit RHESSI *(Reuven Ramaty High Energy Solar Spectroscopic Imager)* habe Gammastrahlungsausbrüche im Zusammenhang mit Gewittern aufgezeichnet – aus einer Erdumlaufbahn in 600 Kilometer Höhe!

Gegenwärtig stocken wir die Zahl unserer Röntgendetektoren von fünf auf mehr als 36 auf. Damit können wir eine Fläche von einem Quadratkilometer auf dem Institutsgelände in Camp Blanding erfassen. Dies sollte unsere Ausgangsbasis für die Beobachtung natürlicher und künstlich ausgelöster Blitze verbessern sowie unsere Chance erhöhen, weitere Gammastrahlungsausbrüche in Gewitterwolken aufzuzeichnen. Aus der Emission von Röntgen- und Gammastrahlung können wir Rückschlüsse auf die elektrischen Feldstärken in Gebieten ziehen, die einer Messung sonst nur schwer zugänglich sind. Von diesen Ergebnissen erhoffen wir uns schließlich ein besseres Verständnis der Entladungsprozesse, die Blitze auslösen und ihre Ausbreitung ermöglichen.

Die Erforschung von Blitzen mit Hilfe der von ihnen emittierten Röntgenstrahlung ist noch ein so neuartiges Verfahren, dass wir bei fast jedem Experiment neue Erkenntnisse gewinnen. Blitze sind keine gewöhnlichen Funkenentladungen, wie wir sie vom Berühren einer Türklinke kennen. Vielmehr beruhen sie auf einer exotischeren Art der Entladung, die Ausreißerelektronen und Röntgenstrahlung erzeugt. Möglicherweise kann dieser neue Forschungsansatz dazu beitragen, das von Benjamin Franklin vor zweieinhalb Jahrhunderten in Angriff genommene Problem endgültig zu lösen. ◁

AUTOR UND LITERATURHINWEISE



Joseph R. Dwyer ist Associate Professor für Physik und Weltraumforschung am Florida-Institut für Technologie in Melbourne (Florida). Nach seiner Promotion an der Universität von Chicago 1994 forschte er zunächst an der Columbia-Universität in New York und später an der Universität von Maryland in College Park, bis er im Jahr 2000 nach Florida wechselte.

Gewitter – Faszination eines Phänomens. Von Alex Hermant. Delius Klasing Verlag, Bielefeld 2002

Lightning: physics and effects. Von Vladimir A. Rakov und Martin A. Uman. Cambridge University Press, 2003

Energetic radiation produced during rocket-triggered lightning. Von Joseph R. Dwyer et al. in: Science, Bd. 299, S. 694, 31. Januar 2003

The lightning discharge. Von Martin A. Uman. Dover Publications, 2001

Weblinks zu diesem Thema finden Sie bei www.spektrum.de unter »Inhaltsverzeichnis«.

Ein Genom voller Alternativen

Wie konnten höhere Organismen, einschließlich Menschen, mit so wenigen Genen so komplex werden? Ihr Geheimnis liegt wohl großenteils in der Evolution eines Mechanismus, der das begrenzte Budget vielfältig zu nutzen erlaubt.

Von Gil Ast

Molekularbiologen starteten im Frühjahr 2000 eine Wette, wie viele Gene im menschlichen Genom nach seiner vollständigen Sequenzierung wohl gefunden würden. Jeder konnte einen Dollar auf den von ihm favorisierten Wert setzen. Die höchste Schätzung lag damals bei 153 000 verschiedenen Genen, der am meisten favorisierte Bereich aber bei weniger als einem Drittel. Zum Vergleich: Lehrbücher sprachen von maximal 100 000; schließlich produziere der menschliche Organismus mehr als 90 000 unterschiedliche Proteine, also sollten wohl mindestens ebenso viele Gene existieren. Außerdem müsste der Mensch angesichts seiner Komplexität mit einer umfangreicheren genetischen Ausstattung aufwarten als zum Beispiel der simple Fadenwurm *Caenorhabditis elegans* mit seinen 19 500 Genen oder die Ackerschmalwand, ein kleines Unkraut, mit ihren 27 000 Genen.

Im darauf folgenden Sommer wurde eine noch nicht endgültige Fassung der Humangenomsequenz publiziert. Ergebnis: lediglich 30 000 bis 35 000 Gene nach vorläufigen Schätzungen des Sequenzierungsteams. Diese geringe Zahl erschien manchem für unsere Spezies geradezu erniedrigend. Mit der immer genaueren Entzifferung wurde sie dann sogar noch weiter nach unten korrigiert, auf weniger als 25 000 Gene.

Unser Markenzeichen könnte es somit gerade sein, das Wenige besonders raffiniert und vielfältig zu nutzen. Diese Ansicht vertraten bereits die frühen Befürworter einer niedrigeren Zahl und verwiesen auf einen schon länger bekannten Mechanismus höherer Organismen: das alternative Spleißen. Dabei wird die molekulare Abschrift eines so genannten Mosaikgens zerlegt und zu Bauanweisungen für zwei oder mehr verschiedene Proteine zusammengesetzt, zusammengespleißt.

Der Vergleich des menschlichen Genoms mit dem anderer Organismen zeigt inzwischen, wie stark das alternative Spleißen zur Diversität zwischen Arten mit relativ ähnlicher Genausstattung beiträgt. Der gleiche Mechanismus dient zudem innerhalb einer Art dazu, mit ein und demselben begrenzten Satz von Genen Körpergewebe mit sehr unterschiedlicher Funktion zu bilden.

Auf Leben und Tod

Tatsächlich steigt die Häufigkeit, mit der Organismen auf alternatives Spleißen setzen, offenbar mit deren Komplexität. Der Mensch nutzt bis zu drei Viertel seiner Gene mehrfach. Vermutlich trug der Spleißmechanismus selbst zur »Höherentwicklung« bei und könnte auch unsere weitere Evolution vorantreiben. Was den medizinischen Bereich anbelangt, so beginnt die Wissenschaft mittlerweile zu verstehen,

- wie fehlerhaftes Spleißen zu verschiedenen Erbkrankheiten und Krebsarten führen kann und
- wie sich dort therapeutisch ansetzen ließe.

Die alternative Verarbeitung genetischer Informationen ist ein nicht zu unterschätzender Aspekt für das korrekte Funktionieren zahlreicher Organismen. Sie kann über Leben und Tod entscheiden – zumindest, wenn es um das weitere Schicksal vorgeschädigter Körperzellen geht. Jede Zelle registriert ständig ihren inneren Zustand und die herrschenden Umgebungsbedingungen. Anhand der gewonnenen Daten entscheidet sie, ob sie weiter wächst und sich teilt oder ein zelluläres Programm zur kontrollierten Selbstzerstörung, die Apoptose, aktiviert. Letzteres geschieht normalerweise, wenn ihre Erbsubstanz DNA nicht mehr zu reparieren ist. So entdeckte ein Team um Craig B. Thomas von der Universität von Pennsylvania in Philadelphia, dass ein Gen namens Bcl-x, ein Apoptose-Regulator, durch alternatives Spleißen zwei verschiedene Proteine hervorbringen kann: Das längere Eiweißmolekül unterdrückt die Apoptose, das kürzere hingegen aktiviert sie.

Dass Zellen ein einzelnes Gen zur Produktion verschiedener Formen eines Proteins nutzen können, ist inzwischen seit rund 25 Jahren bekannt. Dieses Verhalten galt aber zunächst nur als Ausnahme des alten Lehrsatzes »ein Gen – ein Protein«. Wie häufig, ja wie entscheidend die vermeintliche Ausnahme war, offenbarten erst moderne Genomvergleiche.

Trotz dieser dramatischen Wende sind die Grundprinzipien, nach denen eine Geninformation ausgeprägt, »exprimiert« wird, nach wie vor gültig. So enthält die Erbsubstanz von Ein- und Viel- ▷



Die Gene von Mensch und Maus gleichen sich zu 88 Prozent. Viele Unterschiede zu den Nagern rühren nur daher, wie wir unsere genetische Information bearbeiten.

BILL STEELE

▷ zellern alle Anweisungen für Aufbau und Erhaltung des Organismus in Form eines vierbuchstabigen Codes aus DNA-Nucleotiden mit den Basen A, G, C und T (für Adenin, Guanin, Cytosin und Thymin). Die DNA-Doppelstränge im einfachen menschlichen Chromosomensatz umfassen aneinander gereiht etwa drei Milliarden Basenpaare. Zum Ablesen eines Gens öffnet sich lokal der Doppelstrang reißverschlussartig, und die Zelle erstellt dort einzelsträngige Arbeitskopien des Gentexts. Diese Abschriften bestehen aus RNA, einem mit der DNA chemisch eng verwandten Molekül.

Jede DNA-Sequenz, von der eine RNA-Version abgeschrieben wird, ist per Definition ein Gen, nicht unbedingt aber für ein Protein. Etliche der abgeschriebenen RNAs dienen keineswegs als Bauanweisung für Eiweißstoffe, sondern erfüllen Grundaufgaben oder regulatorische Funktionen in der Zelle (siehe »Preziosen im DNA-Schrott«, SdW, 2/2004, S. 68). Proteincodierende RNA-Abschriften gehen dagegen an die zuständige Fertigungsmaschinerie, die sie abliest und in eine Abfolge aus Aminosäuren übersetzt (das sind die Baueinheiten der Eiweißketten). Zuvor jedoch wird aus der ursprünglichen Arbeitskopie eines Mosaikgens erst einmal eine lesefreundliche Version erstellt.

Zu verdanken ist diese Erkenntnis Philip A. Sharp vom Massachusetts Institute of Technology in Camebridge und Richard J. Roberts, heute bei der Firma New England Biolabs in Beverly (Massachusetts). Die beiden Forscher entdeckten 1977, dass neu synthetisierte, primäre RNA-Abschriften zunächst einem Text mit mehreren Einschüben gleichen, die für die Herstellung ihres Proteins bedeutungslos sind. Diese unsinnig erscheinenden Passagen, die »Introns«, müssen herausgeschnitten und die codierenden Abschnitte, die »Exons«, zu einer durchgängigen Bauanweisung verknüpft werden. Dieser Vorgang wurde Spleißen getauft – nach der Technik des nahtlosen Zusammenfügens von Tauen (siehe obere Grafik im Kasten rechts). Aus ihm geht die so genannte reife Boten-RNA hervor, die zu den Produktionsstätten wandert.

Randolph Wall von der Universität von Kalifornien in Los Angeles wies jedoch schon 1980 nach, dass dieses vereinfachte Modell, wonach alle Exons für die Boten-RNA verknüpft, alle Introns aber verworfen werden, nicht immer zutrifft. Die zelluläre Spleißmaschinerie kann nämlich auch »entscheiden«, einzelne Exons hinauszuwerfen oder ein Intron beziehungsweise Teile davon zu belassen. Dieses alternative Spleißen ermöglicht es, aus einem Mosaikgen eine erhebliche Vielfalt herauszuzaubern, und wird zugleich zu einer mächtigen regulatorischen Instanz. Denn davon hängt ab, in welchen Mengen die verschiedenen möglichen Formen eines Proteins in der Zelle entstehen.

Schon ein einziges Exon zu überspringen kann dramatische Konsequenzen für den Organismus haben.

1984 entwickelte Tom Maniatis mit seinen Kollegen von der Harvard-Universität in Cambridge (Massachusetts) ein experimentelles System, mit dem sich die molekulare Spleißmaschinerie im Reagenzglas untersuchen ließ. Ihre Funktion wie auch Regulation ist zwar noch immer nicht in allen Einzelheiten erforscht, doch zeigen die bisherigen Erkenntnisse, dass es sich um ein enorm raffiniertes System mit einer faszinierenden evolutionären Geschichte handelt.

Bei komplexen Organismen erfordert das Spleißen Moleküle von zwei hierarchischen Ebenen. Auf der unteren arbeitet die Basismaschinerie, die bei allen Lebewesen mit Introns im Erbgut vorkommt. Sie hat sich im Lauf der Evolution kaum verändert; von einzelliger Hefe bis zum Menschen erweist sie sich als hoch konserviert, wie Wissenschaftler sagen. Zu dieser Maschinerie gehören fünf kleine Kern-RNAs, die nur im Zellkern vorkommen, und zwar jene mit dem Kürzel U1, U2, U4, U5 und U6. Diese Moleküle formieren sich mit insgesamt bis zu 150 Proteinen zu einem riesigen Komplex, der als Spleißosom bezeichnet wird. Das Gebilde erkennt, wo ein Intron in der RNA anfängt und wo es endet, schneidet es heraus und verbindet die Exons zur reifen Boten-RNA.

Männlich oder weiblich: eine Frage des Spleißens

Wo das Spleißosom schneiden soll, zeigen ihm vier verschiedene kurze Signalsequenzen im Intron an. Das erste Signal sitzt am Anfang und wird fachlich als 5 -Spleißstelle (sprich »5-Strich«) bezeichnet. Die drei anderen liegen weiter hinten: die Verzweigungsstelle, der Polypyrimidin-Trakt und schließlich, ganz am Ende, die 3 -Spleißstelle (die Nummerierung hat mit einer chemischen Konvention zu tun).

Ein eigenes regulatorisches System steuert den Prozess, indem es die Basalmaschinerie zu den gewünschten Stellen dirigiert. Bisher wurden mehr als zehn verschiedene Spleißregulatorproteine identifiziert. Gewebe können sich in der Form dieser Moleküle voneinander unterscheiden, selbst verschiedene Entwicklungsstadien ein und desselben Gewebes. Diese Proteine sind beispielsweise im Stande, an bestimmte kurze Sequenzen in den Exons der Primärabschrift anzudocken. Einige dieser Bindungsstellen wirken als Verstärkersequenz: Heftet sich

IN KÜRZE

- Aus einem **kleinen Grundbestand von proteincodierenden Genen** kann eine Zelle ein viel größeres Sortiment an Eiweißstoffen herausholen, indem sie die Teile der abgeschriebenen rohen Bauanweisung zu unterschiedlichen fertigen Versionen zusammenspleißt.
- Dieses **alternative Spleißen** ist zwar schon lange bekannt, doch erst der direkte Vergleich verschiedener entzifferter Genome machte klar, wie verbreitet es bei höheren Organismen einschließlich des Menschen ist und wie sehr es zur unterschiedlichen Evolution von Lebewesen beiträgt, die sich in ihrer Genausstattung ähneln.
- Dass **hoch komplexe Organismen mit so wenig Genen** auskommen, verdanken sie dem alternativen Spleißen und seiner Choreografie. Von ihr hängt ab, wann wo welche Arten von Proteinen entstehen. Hier einzugreifen könnte bei manchen **Krankheiten des Menschen** bald möglich sein.

Ein Gen – viele Proteine

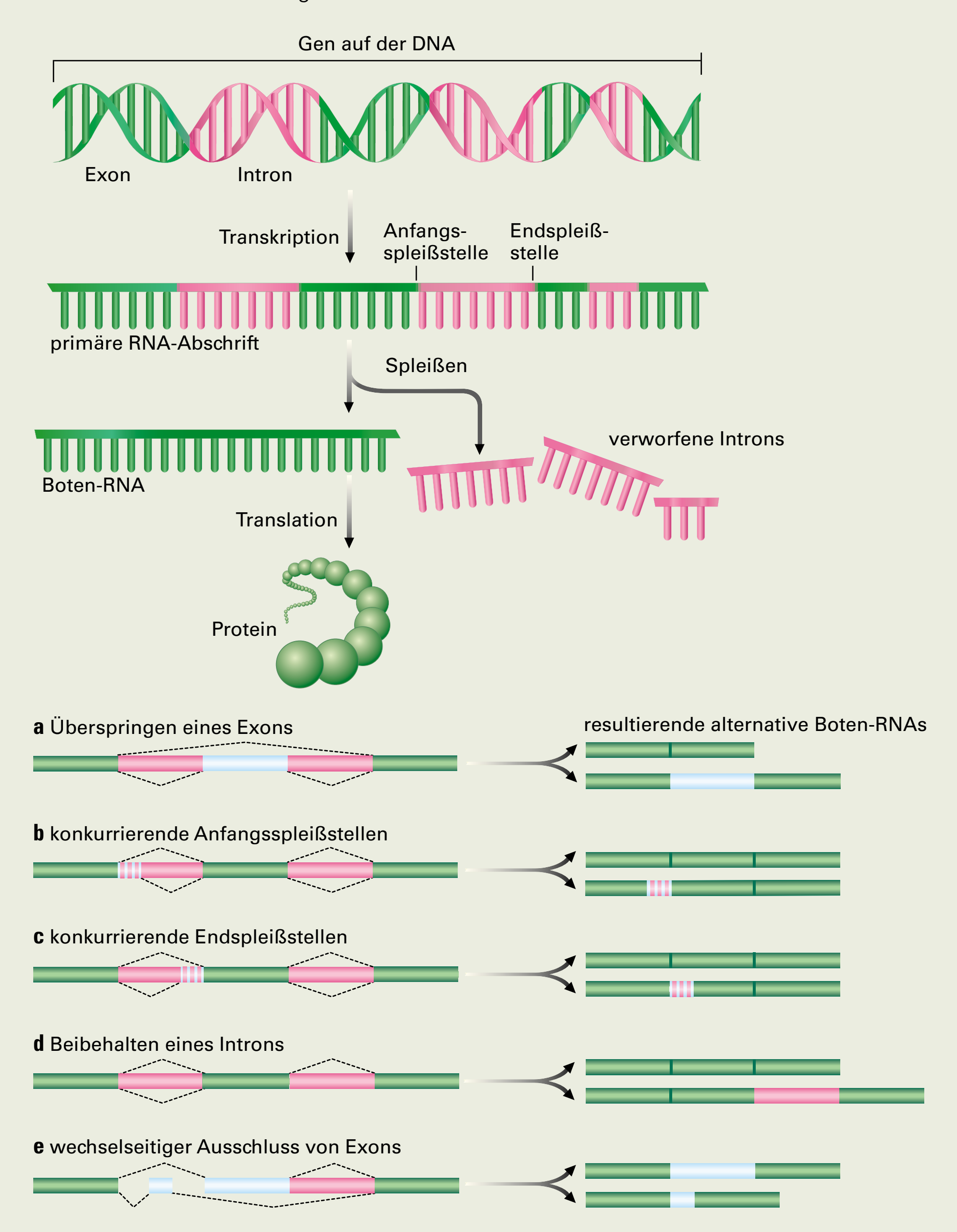
Wie macht sich eine Zelle die gestückelte Information eines so genannten Mosaikgens zu Nutze? Das Grundprinzip ist einfach: Sie erstellt zunächst eine primäre Abschrift in Form von RNA, entfernt daraus überflüssige Einschübe (Introns) und »spleißt« alle codierenden Abschnitte (Exons) zu einer reifen Boten-RNA zusammen. Deren glatt lesbare Information wird dann in Protein übersetzt. Komplexe Organismen spleißen das primäre RNA-Transkript aber oft auf mehrere Arten: Beispielsweise werden Exons verworfen, Introns oder Teile davon aber beibehalten. Dadurch entstehen verschiedene Boten-RNAs und damit mehrere unterschiedliche Proteine auf der Basis eines einzigen Gens.

Einfaches Spleißen

Eine DNA-Sequenz wird in Form einer einzelsträngigen RNA abgeschrieben. Eine spezielle zelluläre Maschinerie bearbeitet diese Primärabschrift: Introns, die durch charakteristische Sequenzen an ihrem Anfang und Ende definiert sind, werden entfernt und verworfen, alle Exons hingegen zu einer Boten-RNA verknüpft. Deren Information dient zur Synthese eines Proteins.

Alternatives Spleißen

Das Primärtranskript eines Gens kann auf mehrere unterschiedliche Arten bearbeitet werden. Gestrichelte Linien zeigen die verschiedenen Verknüpfungsoptionen. So kann ein Exon ausgelassen (a) oder eine konkurrierende Spleißstelle am Anfang (b) oder Ende (c) eines Introns gewählt werden. Zudem ist es möglich, ein Intron zu belassen (d) oder unter sich wechselseitig ausschließenden Exons jeweils nur eines zu nehmen (e).



LUCY READING-IKKANDA

dort das richtige Regulatorprotein an, lockt es letztlich kleine Kern-RNAs der Basalmaschinerie zu den benachbarten Spleißstellen an den beiden Enden des Exons (obere Grafik im Kasten S. 53). Andere dieser Bindungsstellen im Exon wirken als Suppressorsequenz. Koppelt ein Spleißregulatorprotein dort an, so wirkt es sich negativ auf die Fähigkeit der Basalmaschinerie aus, an den Enden des Exons anzudocken. Dieses wird mit den beiden benachbarten Introns aus der RNA herausgeschnitten (untere Grafik im Kasten S. 53).

Schon ein einziges Exon beim Verknüpfen zu überspringen kann dramatische Konsequenzen für den Organismus haben. Bei Taufliegen zum Beispiel wird über ein alternatives Spleißen geregelt, welcher geschlechtsbestimmende Entwicklungsweg einzuschlagen ist. Wird ein »männliches« Exon aus der zu bearbeitenden Abschrift eines Gens namens Sex-lethal mit entfernt, so entsteht ▷

▷ schließlich ein für Weibchen spezifisches Protein. Dieses heftet sich an alle folgenden Primärabschriften des Gens und gewährleistet, dass auch weiterhin nur die weibliche Spleißvariante und damit wieder dieses Protein erzeugt wird. Bleibt dagegen das »männliche« Exon, das ein Stoppsignal enthält, bei der ersten Runde erhalten, entsteht kein funktionsfähiges Eiweiß. Dadurch wird der männliche Entwicklungsweg vorgegeben.

Zahl und Länge dieser Abschnitte. Das zwang höchstwahrscheinlich zu einem Regulatorsystem für die Basismaschinerie, das statt kurzer Introns zwischen Exons nun kurze Exons in einem Meer von Introns erkennt. Ein menschliches Proteingen zum Beispiel ist durchschnittlich 28 000 Basenpaare lang, verteilt im Mittel auf 8,8 Exons und 7,8 Introns. Ein Exon selbst ist mit gewöhnlich etwa 120 Basenpaaren recht kurz, während ein Intron 100 bis 100 000 umfassen kann.

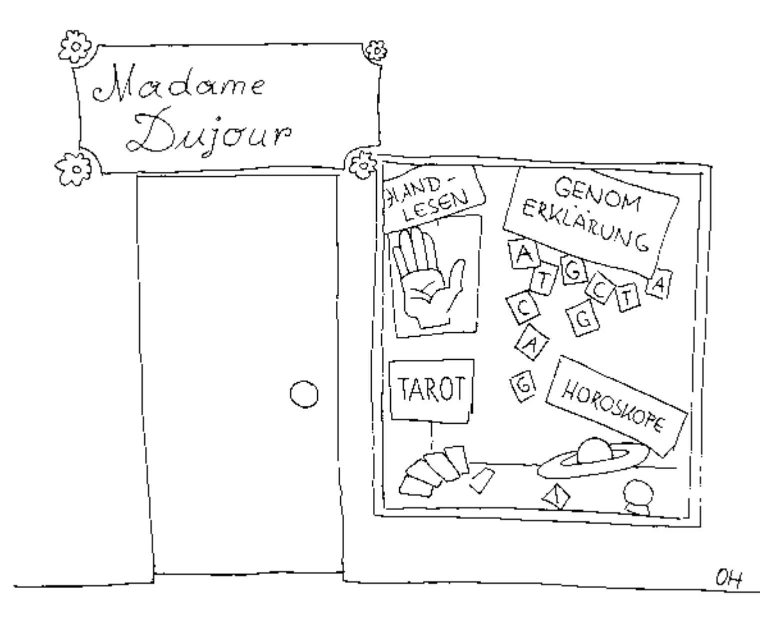
Weshalb blieb in der Evolution ein so kompliziertes System erhalten, das schwere Krankheiten verursachen kann?

Exons zu verwerfen, sie zu überspringen, ist mit 38 Prozent die häufigste Form alternativen Spleißens bei Säugetieren. Mehrere andere Formen existieren (untere Grafik im Kasten auf S. 51). Zum Beispiel können Introns in der reifen Boten-RNA zurückbleiben. Diese Intronretention wird vor allem von Pflanzen und einfach gebauten Vielzellern genutzt. Vermutlich ist sie die evolutionär älteste Variante.

Noch heute arbeitet die Spleißmaschinerie von einzelligen Organismen mit echtem Zellkern, wie der Hefe, nach dem Prinzip, die beiden Enden eines Introns zu erkennen. Das gelingt ihr nur für Einschübe unter 500 »Buchstaben« Länge, was für die Backhefe völlig ausreicht, da ihr Erbgut nur wenige Introns mit durchschnittlich 270 Bausteinen enthält. Nun wuchsen aber mit steigender Genomgröße der sich entwickelnden Vielzeller auch

Der Mensch besitzt die höchste Zahl von Introns pro Gen überhaupt. Dies wirft eine interessante Frage auf. Einschübe in dieser Zahl und Größe zu unterhalten ist eine biologisch recht aufwändige Angelegenheit. Ein erheblicher Teil der Energie, die der menschliche Körper verbraucht, geht drauf, um Introns in der DNA beizubehalten und zu reparieren, sie in RNA mit abzuschreiben, danach herauszuschneiden und ihr Material schließlich abzubauen oder wiederzuverwerten. Das Ganze kann zudem zu teuren Fehlern führen, da jeder falsche Schnitt letztlich die proteincodierende Sequenz der RNA verändert. Das resultierende Protein arbeitet dann womöglich nicht oder falsch.

Ein von mir untersuchtes Beispiel ist die familiäre Dysautonomie, eine angeborene Störung des Nervensystems. Verursacht wird sie durch eine einzige mutierte



Base in einem Gen mit dem Kürzel IKBKAP, weil dessen Abschrift nun im Nervengewebe in einer Weise alternativ gespleißt wird, dass zu wenig von dem Standardprotein entsteht. Das Nervensystem entwickelt sich nicht mehr normal. Etwa die Hälfte der Patienten stirbt noch vor dem dreißigsten Lebensjahr.

Mindestens 15 Prozent aller Genmutationen, die zu Erbkrankheiten und vermutlich auch zu manchen Formen von Krebs führen, beeinträchtigen das Spleißen von Primärabschriften. Weshalb blieb aber dann im Lauf der Evolution ein so aufwändiges, dabei nicht ungefährliches System erhalten? Wohl weil der Nutzen die Risiken überwiegt.

Dank alternativem Spleißen kann pro Gen mehr als eine Sorte Boten-RNA und damit auch mehr als eine Sorte Protein erzeugt werden. Damit bringt es der Mensch gewiss auf mehr als 90 000 Eiweißstoffe, ohne die entsprechende Anzahl Gene vorhalten zu müssen. Im Durchschnitt wird jedes unserer Gene in seiner RNA-Form auf mehr als drei verschiedene Arten gespleißt. Dies erklärt jedoch noch nicht, weshalb ihr informativer Text durch so viele und so lange Introns unterbrochen ist. Hinzu kommen die Abstände zwischen verschiedenen Genen, sodass deren Exons insgesamt lediglich ein bis zwei Prozent unseres Genoms ausmachen.

Sinnvoller Schrott

Diese Genleere, die in der Feinversion des menschlichen Erbguts von 2001 zu Tage trat, blieb nicht das einzig Irritierende. Im Folgejahr wurde das entzifferte Mausgenom veröffentlicht – mit fast der gleichen Anzahl von Genen wie beim Menschen. Obwohl der letzte gemeinsame Vorläufer der beiden Arten vor annähernd 100 Millionen Jahren gelebt hatte, leiten sich die Gene heutiger Menschen und Mäuse in der Mehrzahl noch von ihm ab. Die meisten weisen bei beiden Spezies die gleiche Intron-Exon-Anordnung auf und auch die Sequenzen der Exons sind in hohem Maß konserviert. Wenn sich also die Genome von Mensch und Maus so ähneln, weshalb unterscheiden wir uns dennoch so stark von den Nagern?

Christopher J. Lee und Barmak Modrek von der Universität von Kalifornien in Los Angeles zeigten kürzlich, dass etwa ein Viertel aller alternativ gespleißten Exons bei Mensch und Maus jeweils artspezifisch sind. Daraus könnten also arteigene Proteine hervorgehen, die für eine Auseinanderentwicklung verantwortlich sein mögen. Eine bestimmte Gruppe alternativ gespleißter Exons existiert sogar nur bei Primaten – Menschen wie Affen – und dürfte zu deren evolutionärer Abspaltung von den übrigen Säugern beigetragen haben. Schaut man sich näher an, wie es zur Geburt eines solchen Exons kommt, lassen sich auch die Vorteile von Introns allgemein erkennen. Und man begreift, weshalb sich der Energieaufwand zum Betrieb dieses komplexen Systems biologisch lohnt.

Diese »Primaten-Exons« leiten sich aus speziellen mobilen Elementen ab, ▷

Die Spleißmaschinerie

Nach der Synthese der primären RNA-Abschrift übernimmt das Spleißosom – ein großer Komplex aus Proteinen und speziellen RNA-Arten – das weitere Bearbeiten. Bei höheren Organismen wird der Prozess unter anderem von Spleißregulatorproteinen (SR) gesteuert. Diese definieren für andere Komponenten, was als Exon zu werten ist und lenken so das Spleißosom zu den gewünschten Schnitt- und Klebstellen. Sie bestimmen also, wann welche Spleißformen einer Abschrift entstehen – und damit auch die jeweilige Art von Protein. Die SR-Proteine selbst werden ihrerseits in Varianten erzeugt, je nach Gewebe- oder Zelltyp. Ihr Muster wechselt zudem in verschiedenen Entwicklungsstadien eines Gewebes.

Definieren von Exons

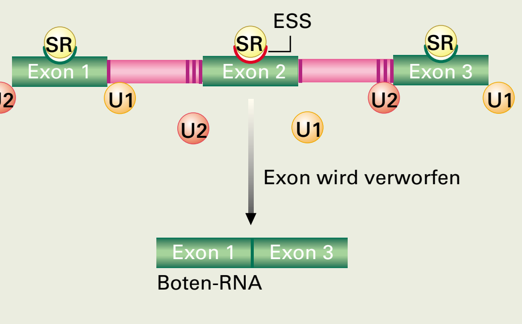
Ein SR-Protein macht die zu übernehmenden Exons der Abschrift kenntlich, indem es an eine bestimmte Sequenz – den Exon-Spleißverstärker (englisches Kürzel ESE) – andockt. Es rekrutiert dann zwei kleine Kern-RNAs (snRNAs) namens U1 und U2, die sich an die Spleißstellen am Übergang zu den beiden benachbarten Introns heften.

Bildung des Spleißosoms

Nachdem die beiden snRNAs U1 und U2 die Spleißstellen des Introns besetzt haben, bilden sie einen Komplex mit weiteren snRNAs und mehr als hundert Proteinen. Das so entstandene Spleißosom schneidet die Introns exakt heraus und verbindet die Exons zur reifen Boten-RNA.

Suppression des Spleißens

Ein geeignetes SR-Protein kann das Anheften der snRNAs auch unterdrücken, statt verstärken, wenn es an einen so genannten Exon-Spleißsuppressor (ESS) andockt. Dann wird das betroffene Exon zusammen mit den benachbarten Introns aus der Abschrift eliminiert. Dieses Auslassen von Exons ist die häufigste Form des alternativen Spleißens bei Menschen und Säugetieren.



LUCY READING-IKKANDA



Nicht nur die Evolution der Primaten an sich, sondern auch die Abspaltung der menschlichen Linie von den übrigen Primaten könnte zumindest zum Teil auf alternativem Spleißen beruhen. Denn die fast identischen Gene von Mensch und Schimpanse produzieren zwar in den meisten Geweben weit gehend die gleichen Proteine. In Teilen des menschlichen Gehirns sind jedoch einige Gene aktiver und andere liefern durch alternatives Spleißen erheblich abweichende Proteine.

▷ den so genannten Alus. Und die gehören wieder zur großen Klasse der Retrotransposons. Das sind kurze DNA-Sequenzen, die sich eher wie winzige Genomparasiten verhalten. Sie erzeugen nämlich Kopien von sich, die sich an zufälliger Stelle ins Erbgut ihrer Wirtszelle integrieren. Retrotransposons kommen bei praktisch allen bisher untersuchten Arten vor. Sie trugen entscheidend dazu bei, dass sich während der Evolution vielzelliger Organismen die Genome erweiterten. Fast die Hälfte der menschlichen DNA besteht mittlerweile aus transponierbaren Elementen jeglicher Art. Die meisten – mit rund 1,4 Millionen – sind Alus, und viele davon vervielfältigen sich weiter: Jedes hundertste bis zweihundertste Neugeborene trägt eine an neuer Stelle eingebaute Kopie.

Alu-Elemente sind in der Standardversion knapp 300 Basenpaare lang und zeichnen sich durch eine charakteristische DNA-Sequenz aus. Lange als evolutiver Schrott angesehen, gewannen sie erst etwas an Reputation, als klar wurde, wie ihr Einfügen die proteincodierende Kapazität eines Gens erweitern kann.

Etwa fünf Prozent der alternativ gespleißten Exons im Humangenom enthalten ein Alu-Element. Vermutlich entstanden sie ursprünglich, als ein Alu in ein Intron »hineinsprang«; dort richtet es in der Regel keinen Schaden an, weil Introns in der Abschrift bei Primaten meist herausgeschnitten werden. Nachfolgende Mutationen im Alu-Element könnten jedoch, wenn sie eine neue Spleißstelle schaffen, die Zellmaschinerie einen Teil des Introns als »Exon« werten lassen, ihn exonisieren. (Solche Mutationen entstehen meist als »Druckfehler« beim Kopieren des Genoms vor der Zellteilung.)

Wird ein neues Alu-Exon nicht prinzipiell, sondern lediglich wahlweise zum Bestandteil der Endabschrift, bietet sich die Chance, bei Übernahme ein neuartiges Protein herzustellen – ohne die ursprüngliche Funktion des Gens zu stören. Denn solange das Exon beim alternativen Spleißen auch verworfen wird, entsteht weiterhin noch die normale Bauanweisung. Problematisch wird eine Alu-Mutation, wenn das zugehörige Exon immer – konstitutiv – in der fertigen Bauanweisung vorkommt und das veränderte Protein das alte nicht zu ersetzen vermag. Bisher wurden drei auf fehlplatzierten Alu-Sequenzen beruhende Erbkrankheiten identifiziert: Das Alport-Syndrom (eine Nierenerkrankung, teils kombiniert mit Schwerhörigkeit), das Sly-Syndrom (eine Mukopolysaccharid-Speicherkrankheit) und der Ornitin-Aminotransferase-Mangel (eine Erkrankung der Netz- und Aderhaut des Auges).

Mit meinen Kollegen konnte ich nachweisen, dass bereits ein einzelner Basenaustausch genügt, um manche stummen intronischen Alu-Sequenzen in echte Exons zu verwandeln. Derzeit enthält das menschliche Erbgut insgesamt rund 500 000 intronische Alus, von denen sich 25 000 durch eine solche Punktmutation in Exons verwandeln könnten. In Alu-Elementen steckt also das Potenzial, den Bestand an informationsträchtigen Sequenzen für neue menschliche Proteine auch künftig stark zu bereichern.

Ungefähr 3000 Wissenschaftler in weltweit 400 Labors arbeiten an der Erforschung der überaus komplizierten Mechanismen des alternativen Spleißens. Obwohl erst ganz am Anfang, sehen sie hinter den Ergebnissen der letzten Jahre bereits künftige medizinische Anwendungen. Dazu zählen neuartige Formen der Gentherapie, die den Spleißmechanimus zur Therapie von Erbkrankheiten und anderen Leiden wie Krebs ausnutzen.

Ein denkbarer Ansatz beruht auf dem »Paarungsverhalten« von DNA- oder RNA-Strängen: Kurze synthetische Stücke, deren Sequenz gegensinnig (englisch antisense) komplementär zu einer Zielstruktur auf dem Erbgut oder der RNA-Abschrift ist, lagern sich ebendort an. Solche Antisense-Moleküle lassen sich in erkrankte Zellen einbringen, um bestimmte Spleißstellen oder andere regulatorische Sequenzen zu maskieren. Ein Team um Ryszard Kole von der Universität von North Carolina in Chapel Hill hat dies an menschlichen Blutvorläuferzellen demonstriert, die aus Patienten mit bestimmten Formen von beta-Thalassämie stammten. Bei dieser häufigen Erbkrankheit führt oft eine überzählige Spleißstelle zur Bildung von abnormem Hämoglobin. Durch die Maskierung wurde wieder vermehrt an den korrekten Stellen geschnitten und somit funktionsfähiges Hämoglobin erzeugt.

Später wandte Kole das gleiche Verfahren auch bei menschlichen Krebszellen in Kultur an. Wieder versuchte er, eine Spleißstelle zu maskieren, in diesem Fall in der Abschrift des eingangs erwähnten Apoptoseregulators Bcl-x. Sie war so gewählt, dass ein Exon mitsamt

einem Intron herausflog, sofern die Maskierung gelang. Dadurch entstand mehr Boten-RNA für die kurze Proteinvariante und entsprechend weniger für die lange, welche die Apoptose hemmt. Bei einigen Krebszellen aktivierte dies unmittelbar das Selbstmordprogramm. Bei anderen verstärkte es den Apoptose fördernden Effekt der gleichzeitig verabreichten Chemotherapeutika.

Eine weitere Möglichkeit zur therapeutischen Nutzung des alternativen Spleißens präsentierten 2003 Adrian Krainer und sein Kollege Luca Cartegni vom Cold Spring Harbor Laboratorium auf Long Island (New York). Sie veranlassten Zellen, ein sonst übersprungenes Exon in die Endabschrift einzubeziehen. Dazu entwarfen sie ein synthetisches Zwittermolekül, dessen eines Ende sich komplementär zu jeder gewünschten Sequenz der Primärabschrift gestalten ließ und dessen anderes Ende aus dem Teil eines Spleißregulatorproteins bestand, der letztlich die Schneid- und Klebemaschinerie rekrutierte.

Gentherapie der besonderen Art

Mit dieser Methode behoben die beiden Forscher einen Spleißdefekt bei kultivierten menschlichen Zellen, die bestimmte mutierte Versionen des BRCA1-Gens trugen, wie sie bei Brustkrebs vorkommen. Ähnlich verliefen Experimente zu Spleißvarianten des SMN2-Gens, die mit der Entstehung der spinalen Muskelatrophie zusammenhängen können.

Ein dritter Ansatz nutzt die Fähigkeit des Spleißosoms aus, auch Teile zweier Primärtranskripte zu einer kombinierten Boten-RNA zusammenzufügen. Dieses so genannte trans-Spleißen kommt bei Fadenwürmern häufiger vor, in menschlichen Zellen aber nur selten. Mit einem raffinierten Verfahren kann es erzwungen werden, sodass Zellen aus der Primärabschrift eines mutierten, aber gewebegerecht regulierten Gens den ganzen fehlerhaften Abschnitt präzise entfernen und durch die normale proteincodierende RNA-Sequenz ersetzen. Erzeugt wird diese an einem eigens eingeschleusten unmutierten Teilgen, das eine spezielle Zusatzausstattung trägt.

Ein Team um John F. Engelhardt von der Universität von Iowa in Iowa City verwendete diese Technik bei Zellen aus den Schleimhäuten der Atemwege von Mukoviszidose-Kranken. Bei dieser Erbkrankheit ist das Protein eines Ionenkanals defekt. Nach der Manipulation erzeugten die Zellen einen gewissen Prozentsatz korrekter Moleküle.

Vor der Entzifferung des menschlichen Genoms hätten wohl nur wenige Fachleute geglaubt, dass so komplexe Lebewesen wie der Mensch mit nur 25 000 Genen auskommen. Inzwischen aber hat sich das alternative Spleißen als Schlüsselprozess hierfür erwiesen: Er erzeugt aus einem kleinen Repertoire an Genen das viel größere Sortiment an Proteinen, das den menschlichen Körper und Geist hervorbringt, und ermöglicht es zugleich, ihre Produktion zeitlich und räumlich präzise abzustimmen. Überdies liefert er eine Erklärung, wie sich Menschen, Mäuse und wohl alle anderen Säugetiere trotz großenteils sehr ähnlicher Genome so verschieden entwickeln konnten.

Die Evolution erzeugt immer neue molekulare Varianten und selektiert dann diejenigen, die einen biologischen Vorteil aufweisen. Somit trugen neuartige Proteine, kreiert durch das Einspleißen neu entstandener Alu-Exons, vermutlich dazu bei, uns Menschen zu dem zu machen, was wir heute sind. Und unseren Verstand werden wir wiederum nutzen, um die Lebensqualität von Patienten mit zahlreichen verschiedenen Erkrankungen zu verbessern. ◁

AUTOR UND LITERATURHINWEISE



Gil Ast ist Dozent an der Abteilung für Humangenetik und molekulare Medizin der Medizinischen Hochschule der Universität von Tel Aviv. Schwerpunkte seiner wissenschaftlichen Arbeit sind Spleißmechanismen, deren Evolution sowie krankheitsverursachende Spleißfehler. Gemeinsam mit Wissenschaftlern der Firma Compugen entwickelte er eine Bioinformatik-Software, mit der anhand von Gensequenzen alternative Spleißschemata und damit neuartige Proteinvarianten identifiziert werden können.

Das verkannte Genom-Programm. Von John S. Mattick in: Spektrum der Wissenschaft, März 2005, S. 62

How did alternative splicing evolve? Von Gil Ast in: Nature Reviews Genetics, Bd. 5, S. 773, Oktober 2004

Alternative splicing: increasing diversity in the proteomic world. Von B. R. Graveley in: Trends in Genetics, Bd. 17, Nr. 2, S. 100, Februar 2001

Weblinks zu diesem Thema finden Sie bei www.spektrum.de unter »Inhaltsverzeichnis«.

Das Ende des Elends

Marktwirtschaft und Globalisierung befreien viele Menschen aus extremer Armut – aber bei Weitem nicht alle. Darum sind Maßnahmen nötig, um den Ärmsten der Armen zu helfen.

Von Jeffrey D. Sachs

Fast alle Menschen, die je auf dieser Erde gelebt haben, mussten bitterste Armut erdulden. Hunger, Tod bei der Geburt, Infektionskrankheiten und zahllose andere Gefahren waren im Lauf der Geschichte die traurige Regel. Erst um 1750 begann sich mit der industriellen Revolution das Schicksal der Menschheit allmählich zu wandeln. Wissenschaftliche Erkenntnisse und technische Erfindungen ermöglichten einem wachsenden Anteil der Weltbevölkerung, dem Elend zu entrinnen.

Heute, zweieinhalb Jahrhunderte später, ist der Grundbedarf von mehr als fünf der gegenwärtig 6,5 Milliarden Menschen auf der Erde einigermaßen gesichert. Von dieser Mehrheit darf man mit Fug und Recht behaupten, sie sei der ehedem alltäglichen Not entkommen. Doch noch immer kämpft einer von sechs Bewohnern dieses Planeten Tag für Tag um die Befriedigung elementarster Bedürfnisse: ausreichende Nahrung, sauberes Trinkwasser, sichere Unterkunft, Beseitigung von Abfall, Abwasser und Fäkalien sowie medizinische Grundversorgung. Diese Menschen müssen mit weniger als einem US-Dollar pro Tag auskommen und werden von öffentlichen Diensten für Gesundheit, Bildung und Infrastruktur ignoriert. Tagtäglich sterben mehr als 20 000 von ihnen an äußerster Armut – an purem Mangel von Nahrung, Trinkwasser, Arzneien oder anderen lebenswichtigen Gütern.

Zum ersten Mal in der Geschichte ermöglichen wissenschaftlich-technischer Fortschritt und sich selbst verstärkende Kapitalakkumulation eine prosperierende Weltwirtschaft, welche die extreme Armut ganz und gar zu beseitigen vermag. Diese Erwartung mag manchem wirklichkeitsfremd erscheinen, doch der dramatische Wirtschaftsaufschwung Chinas, Indiens und anderer Teile Asiens in den letzten 25 Jahren zeigt, dass sie durchaus realistisch ist. Außerdem dürfte die für Mitte dieses Jahrhunderts vorhergesagte Stagnation des Bevölkerungswachstums die Belastung des Klimas, der Ökosysteme und der natürlichen Ressourcen verringern, die andernfalls die wirtschaftlichen Zuwächse zunichte machen könnte.

Obgleich die wachsende Wirtschaft offensichtlich fähig ist, riesige Menschenmassen aus äußerster Not zu befreien, geschieht dies keineswegs automatisch und unvermeidlich. Marktkräfte und freier Handel genügen nicht. Viele der ärmsten Regionen sitzen in einer Armutsfalle: Ihnen fehlt Geld für die notwendigsten Investitionen in Infrastruktur, Bildung, Gesundheitswesen und andere lebenswichtige Bedürfnisse. Abhilfe könnte eine konzertierte globale Aktion schaffen, zu der sich die internationale Staatengemeinschaft verpflichtet hat, als sie im Jahr 2000 beim Millennium-Gipfel der Vereinten Nationen umfassende Entwicklungsziele verabschiedete. Seitdem haben sich Entwicklungsbehörden, internationale Geldgeber, Nichtregierungsorganisationen sowie Kommunen in zahlreichen Entwicklungsländern zu einem weltweiten Netzwerk zusammengeschlossen, um mit Sachverstand und gutem Willen die damals gesteckten Ziele zu erreichen.

Eine >klinische< Ökonomie

Im Januar 2005 veröffentlichte ich gemeinsam mit meinen Kollegen vom UN-Millennium-Projekt einen Plan, der vorsieht, bis 2015 den Anteil der extremen Armut gegenüber 1990 zu halbieren sowie weitere quantitative Ziele bei der Bekämpfung von Hunger, Krankheit und Umweltschädigung zu erreichen. In meinem soeben auch auf Deutsch erschienenen Buch »Das Ende der Armut« behaupte ich, dass ein groß angelegtes und gezieltes öffentliches Investitionsprogramm das ganze Problem bis 2025 zu lösen vermag – ähnlich wie bei der weltweiten Ausrottung der Pocken. Da diese Hypothese umstritten ist, ergreife ich gern die Gelegenheit, hier die Hauptargumente zu erläutern und auf verschiedene Einwände einzugehen.

In den letzten Jahren haben Wirtschaftswissenschaftler zahlreiche neue Erkenntnisse darüber gewonnen, wie sich Länder entwickeln und welche Hindernisse dabei auftauchen. Wir brauchen eine neuartige, wissenschaftlich besser begründete Entwicklungsökonomie – eine »klinische Ökonomie« analog zur modernen Medizin. Heutige Ärzte wissen, dass jede Krankheit die Folge zahlreicher Faktoren und deren Wechselwirkung ist: Erreger, Ernährung, Umwelt, Alter, Gene, Lebensstil. Für die richtige Therapie gilt es, die Ursachen im Einzelfall zu ermitteln. Und das verlangt, wie Ärzte wissen, ▷

Die Welt im Jahr 2050

In diesem Heft:



MAGNUM PHOTOS, IAN BERRY

Extreme Armut könnte in wenigen Jahrzehnten der Vergangenheit angehören, wenn die wohlhabenden Länder einen geringen Prozentsatz ihres Reichtums abgäben, um den 1,1 Milliarden völlig mittellosen Menschen auf der Welt aus der schlimmsten Armut herauszuhelfen. Das Bild zeigt die einzige Wasserleitung eines Dorfes in Ghana.

diagnostische Fähigkeiten. Ähnlich brauchen die Entwicklungsökonomen bessere diagnostische Fertigkeiten, um die vielfältigen Ursachen für ökonomische Fehlentwicklungen erkennen zu können, denn vieles davon sprengt den Horizont herkömmlicher Wirtschaftspraxis.

Die öffentliche Meinung in den reichen Ländern gibt die Schuld an extremer Armut häufig den Armen selbst – oder zumindest ihrer Regierung. Früher einmal galt Rasse als entscheidender Faktor. Dann war es Kultur: religiöse Spaltungen und Tabus, Kastensysteme, mangelnde Privatinitiative, Diskriminierung der Frau. Solche Theorien verschwanden, als immer mehr höchst unterschiedliche Religionen und Kulturen relativen Wohlstand erlangten. Außerdem verändern sich vermeintlich unwandelbare Kulturaspekte – zum Beispiel Kinderreichtum und Geschlechter- oder Kastenrollen – oft dramatisch, wenn Verstädterung und Wirtschaft wachsen.

Seit neuestem schieben Kommentatoren alles auf »schlechte Regierungsführung« (poor governance), womit oft nichts anderes als Korruption gemeint ist. Demnach besteht die extreme Armut fort, weil die Regierung es versäumt, ihre Märkte zu öffnen, öffentliche Dienste zu schaffen und gegen Bestechung vorzugehen. Angeblich müsste das Regime nur seine Hausaufgaben machen, dann würde das Land florieren. Die Entwicklungshilfe hat sich großenteils in eine Vortragsreihe über gute Regierungsführung verwandelt.

Seit es Ländervergleiche und Langzeitstudien gibt, können die Experten viel systematischere Analysen durchführen. Zwar geht die Debatte weiter, doch die meisten Indizien besagen, dass das Wirtschaftswachstum keineswegs allein von der Regierungsführung abhängt. Nach Umfragen der Antikorruptionsorganisation Transparency International halten Wirtschaftsführer viele schnell wachsende Länder Asiens für korrupter als manche langsam wachsenden in Afrika.

DIE ARMUTSFRAGE

Das Problem

▶ Ein Großteil der Menschheit hat sich seit Beginn der industriellen Revolution Mitte des 18. Jahrhunderts aus tiefer Armut befreit. Doch rund 1,1 der heutigen 6,5 Milliarden Erdbewohner leiden noch immer bitterste Not.

▶ Diese Unglücklichen müssen mit weniger als 1 US-Dollar pro Tag auskommen. Sie haben kaum Zugang zu ausreichender Nahrung, sauberem Trinkwasser, fester Behausung, sanitären Einrichtungen und medizinischer Versorgung. Was können die Industrieländer tun, um diese Menschenmassen aus extremer Armut zu befreien?

Der Plan

▶ Eine Verdopplung der internationalen Entwicklungshilfe auf 160 Milliarden Dollar jährlich würde die unerträgliche Not, die einer von sechs Menschen erduldet, erheblich lindern. Diese Summe entspricht 0,5 Prozent des Bruttoinlandsprodukts (BIP) der reichen Länder. Da diese Investitionen die Finanzierung wichtiger Infrastruktur-, Klimaschutz- und Wiederaufbauprojekte nicht einschließen, sollten die Geberländer sich verpflichten, bis 2015 das seit Langem zugesagte Ziel von 0,7 Prozent des BIP zu erreichen.

▶ Die Spenden sollten vor allem an lokale Gruppen vergeben und genau kontrolliert werden, damit sie wirklich die Notleidenden erreichen.



MAGNUM PHOTOS, CHRIS STEELE-PERKINS

Nahrung für junge afrikanische Flüchtlinge

Krankheit und Dürre als Hindernis

Die Geografie – natürliche Ressourcen, Klima, Topografie sowie Nähe zu Handelsrouten und bedeutenden Märkten – ist mindestens so wichtig wie eine gute Regierung. Schon im Jahr 1776 erkannte der schottische Nationalökonom Adam Smith, dass die Entwicklung der Binnenregionen von Afrika und Asien durch hohe Transportkosten gelähmt wurde. Auch andere geografische Besonderheiten wirken hemmend, etwa die schwere Bürde der Tropenkrankheiten. Wie mein Kollege Xavier Sala-i-Martin von der Columbia-Universität in New York erst kürzlich wieder nachwies, wachsen tropische Länder, in denen die Malaria grassiert, langsamer als malariafreie. Zum Glück gilt, dass geografische Faktoren das wirtschaftliche Schicksal eines Landes zwar prägen, aber nicht allein darüber entscheiden. Die Technik vermag die Geografie zu überwinden: Gegen Dürre helfen Bewässerungssysteme, gegen Abgeschiedenheit Straßen und Mobiltelefone, gegen Krankheiten Vorbeugen und Behandeln.

Die zweite wichtige Erkenntnis lautet: Zwar lässt sich extreme Armut am wirksamsten durch Ankurbeln des allgemeinen Wirtschaftswachstums verringern, aber der warme Regen erreicht nicht unbedingt alle. Das Durchschnittseinkommen mag steigen, doch bei ungleicher Einkommensverteilung profitieren die Armen davon vielleicht so wenig, dass – insbesondere in geografisch benachteiligten Regionen – Nischen ex-



Chronisches Elend: arme Menschen in einer reichen Welt

Zwar kommt überall auf der Welt Dauerarmut vor, doch in bestimmten Regionen gehäuft. Vielen Untersuchungen zufolge ist das Problem der extremen Armut – weniger als 1 Dollar pro Tag – am schlimmsten in Schwarzafrika, in den Hochländern der Anden und Mittelamerikas sowie in den Binnenländern Zentralasiens. Auf der Weltkarte des britischen Chronic Poverty Research Centre entspricht die Fläche eines Landes der Anzahl seiner chronisch Armen. Die Farbe gibt das Einkommensniveau der ärmsten Einwohner an. Wo die offiziellen Daten nicht ausreichten, wurden die Werte geschätzt.

absolut arm
sehr arm
nicht sehr arm
mangelnde Daten
Industrieländer

Abkürzung	Land	Abkürzung	Land	Abkürzung	Land	Abkürzung	Land
AT	Äthiopien	KA	Kamerun	ML	Mali	SO	Somalia
AO	Angola	KE	Kenia	MR	Mauretanien	SA	Südafrika
BF	Burkina Faso	KM	Komoren	MS	Mosambik	SU	Sudan
BI	Burundi	DK	Demokratische Republik Kongo	NG	Niger	TS	Tansania
BE	Benin	KB	Kongo (Brazzaville)	NI	Nigeria	TG	Togo
EK	Elfenbeinküste	LR	Liberia	RU	Ruanda	TD	Tschad
ER	Eritrea	LS	Lesotho	SM	Sambia	UG	Uganda
GH	Ghana	MG	Madagaskar	SN	Senegal	ZR	Zentralafrikanische Republik
GN	Guinea	MW	Malawi	SL	Sierra Leone	ZW	Zimbabwe

QUELLE: WWW.CHRONICPOVERTY.ORG

tremer Armut übrig bleiben. Überdies schafft der freie Markt allein noch kein Wachstum. Nötig sind auch elementare staatliche Leistungen für Infrastruktur, Gesundheitsversorgung, Bildung und wissenschaftlich-technische Innovation. Darum geht vieles, was Washington in den letzten beiden Jahrzehnten den Regierungen armer Länder empfohlen hat – sie sollen ihre Ausgaben zurückfahren und dem privaten Sektor Platz machen – an der Sache vorbei. Staatliche Investitionen, die gezielt in kritische Bereiche fließen, sind selbst wichtige Wachstumsimpulse – vor allem, wenn die Wirkung die Ärmsten der Armen erreicht.

Was besagen diese Erkenntnisse für Afrika, den heute am stärksten von Armut betroffenen Kontinent? Vor fünfzig Jahren war seine Tropenregion ungefähr so reich wie das subtropische und tropische Asien. Doch während Asien boomte, stagnierte Afrika. Dabei haben geografische Besonderheiten eine entscheidende Rolle gespielt.

Warum Asien boomte

Der wichtigste Faktor ist der Himalaja. Er erzeugt das Monsunklima und die riesigen Flusssysteme Südasiens. Reich mit Wasser versorgte Anbauflächen bildeten in den vergangenen fünf Jahrzehnten den Ausgangspunkt für Asiens raschen Aufstieg aus extremer Armut. Die so genannte Grüne Revolution der 1960er und 1970er Jahre brachte hoch ertragreiche Getreidesorten, Bewässerungssysteme und Kunstdünger; damit wurde der Teufelskreis von Hungersnot, Krankheit und Verzweiflung durchbrochen.

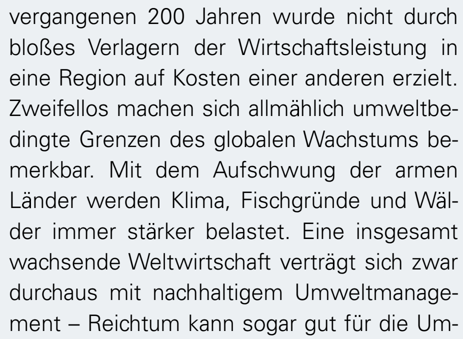
Diese Entwicklung setzte zudem zahlreiche Arbeitskräfte frei, die in den Städten Arbeit suchten. Die Urbanisierung wiederum regte das Wirtschaftswachstum an, denn sie schuf nicht nur Orte für Industrie und Innovation, sondern auch Investitionen für den wachsenden Bedarf an gesunden und qualifizierten Arbeitskräften. Stadtbewohner entschieden sich für weniger Nachwuchs, und damit konnten sie pro Kind mehr für dessen Gesundheit, Ernährung und Bildung ausgeben. Stadtkinder gingen regelmäßiger zur Schule als ihre Altersgenossen auf dem Land. Mit dem Entstehen urbaner Infrastrukturen und eines öffentlichen Gesundheitswesens wurden die Städter auch weniger krankheitsgefährdet als die Landbevölkerung – denn auf dem Land mangelt es in der Regel an sauberem Trinkwasser, moderner Kanalisation, professioneller medizinischer Versorgung und Schutz vor Krankheiten wie ▷

Globalisierung, Armut und Entwicklungshilfe

Die Bürger der Industriestaaten fragen oft, wie sich die Globalisierung der Wirtschaft auf reiche und arme Nationen auswirkt und ob die Hilfsgelder den Entwicklungsländern wirklich zugute kommen. Hier ein paar kurze Antworten:

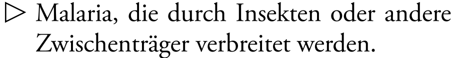
Macht die Globalisierung die Reichen reicher und die Armen ärmer?
Im Allgemeinen nicht. Die Globalisierung fördert den raschen Aufschwung vieler verarmter Länder, vor allem in Asien. Welthandel und Zufluss ausländischen Kapitals sind wichtige Faktoren für Chinas starkes Wirtschaftswachstum im vergangenen Vierteljahrhundert und für das schnelle Wachstum der indischen Wirtschaft seit Anfang der 1990er Jahre. Für die Ärmsten der Armen, insbesondere in Schwarzafrika, wirkt die Globalisierung nicht als Hemmschuh; sie geht praktisch an ihnen vorbei.

Ist Armut die Folge von Ausbeutung der Armen durch die Reichen?
Reiche Nationen haben immer wieder arme Länder durch Sklaverei, Kolonialherrschaft und unfairen Handel geplündert. Dennoch ist Ausbeutung eher die Folge von Armut – arme Länder sind gegen Übergriffe wehrlos – als deren Ursache. Armut beruht gewöhnlich auf niedriger Produktivität pro Arbeitskraft infolge mangelnder Gesundheit, fehlender Qualifikation, unzureichender Infrastruktur (Straßen, Kraftwerke, Stromnetz, Häfen), chronischer Unterernährung und Ähnlichem. Ausbeutung trägt zwar durchaus zu diesen Zuständen bei, aber Faktoren wie geografische Isolation, endemische Krankheiten, Umweltzerstörung oder schlechte Bedingungen für die Nahrungsmittelproduktion sind meist wichtiger – und ohne Hilfe von außen schwer zu überwinden.


EMILY HARRISON

Werden höhere Einkommen in den armen Ländern zu niedrigeren Einkommen in den reichen Ländern führen?
Im Großen und Ganzen ist wirtschaftliche Entwicklung ein Positivsummenspiel: Alle können teilhaben, ohne dass einige draufzahlen. Das enorme Wachstum der Weltwirtschaft in den vergangenen 200 Jahren wurde nicht durch bloßes Verlagern der Wirtschaftsleistung in eine Region auf Kosten einer anderen erzielt. Zweifellos machen sich allmählich umweltbedingte Grenzen des globalen Wachstums bemerkbar. Mit dem Aufschwung der armen Länder werden Klima, Fischgründe und Wälder immer stärker belastet. Eine insgesamt wachsende Weltwirtschaft verträgt sich zwar durchaus mit nachhaltigem Umweltmanagement – Reichtum kann sogar gut für die Umwelt sein –, aber nur dann, wenn die Politik die zur ökologischen Nachhaltigkeit nötigen Investitionen anregt.


Wird die bescheidene offizielle Entwicklungshilfe der USA durch private Spenden ausgeglichen?
Nach Schätzungen der Organisation für wirtschaftliche Zusammenarbeit und Entwicklung (OECD) spenden private Stiftungen und Nichtregierungsorganisationen in den USA jährlich rund sechs Milliarden Dollar. Das entspricht 0,05 Prozent des Bruttoinlandsprodukts (BIP). Selbst dann beträgt die gesamte Entwicklungshilfe der USA nur 0,21 Prozent des BIP – einer der niedrigsten Beitragssätze unter allen Geberländern.


▷ Malaria, die durch Insekten oder andere Zwischenträger verbreitet werden.

Afrika erlebte keine Grüne Revolution. Seinen Tropenregionen fehlen weiträumige Flusslandschaften wie in Asien, die großflächige und billige Bewässerung erleichtern. Zudem fällt der Regen höchst unregelmäßig, und die verarmten Bauern können keine Düngemittel kaufen. Die Grüne Revolution setzte zunächst auf Getreidearten wie Wasserreis und Weizen, die in Afrika selten angebaut werden. Erst in den letzten Jahren wurden speziell dort geeignete Hochertragssorten gezüchtet; sie sind aber noch nicht ausreichend verbreitet. Die Nahrungserzeugung pro Kopf geht in Afrika sogar zurück, und die Kalorienaufnahme ist die niedrigste der Welt. Von gesicherter Versorgung kann keine Rede sein. Die meisten Arbeitskräfte sind nach wie vor in der eigenen Landwirtschaft mit dem bloßen Überleben beschäftigt.

Verschärft wird Afrikas landwirtschaftliche Misere durch die erdrückende Bürde der Tropenkrankheiten. Wegen des Klimas und der heimischen Moskitos grassiert die Malaria dort mehr als überall sonst auf der Welt. Durch hohe Transportkosten wird der Kontinent wirtschaftlich isoliert. In Ostafrika beispielsweise fällt der meiste Regen im Landesinnern; darum leben dort auch die meisten Menschen – weit entfernt von Häfen und internationalen Handelsrouten.

In der Armutsfalle

Ganz ähnlich geht es anderen verarmten Teilen der Welt, insbesondere den Hochländern der Anden und Mittelamerikas sowie den Binnenstaaten Zentralasiens. Da sie ökonomisch isoliert sind, vermögen sie – außer für die Förderung von Öl, Gas und wertvollen Mineralien – kaum ausländisches Kapital anzuziehen. Weil die hohen Transportkosten Investoren abschrecken, bleiben die ländlichen Gebiete in einem Teufelskreis aus Armut, Hunger, Krankheit und Analphabetismus gefangen. Im eigenen Land können die nötigen Investitionen nicht aufgebracht werden, da die meisten Haushalte von der Hand in den Mund leben und keine Rücklagen bilden. Die wenigen reichen Familien legen ihr Vermögen lieber im Ausland an. Die Kapitalflucht umfasst nicht nur Finanz-, sondern auch Humankapital: Heimische Fachkräfte wie Ärzte, Pflegepersonal, Wissenschaftler und Ingenieure wandern auf der Suche nach besseren Verdienstmöglichkeiten häufig ins Ausland ab. Perverserweise sind gerade die ärmsten Länder oft Nettoexporteure von Kapital.

Längst existieren Mittel und Wege, diese Hindernisse zu überwinden und wirtschaftliche Starthilfe zu geben. Malaria lässt sich mit Moskitonetzen, Mückenspray und verbesserten Medikamen-

ten bekämpfen. Von Dürre bedrohte afrikanische Länder mit ausgelaugten Böden können von Tröpfchenbewässerung und höherem Düngemitteleinsatz enorm profitieren (siehe den folgenden Beitrag auf S. 66). Binnenländer finden durch befestige Straßen, Flughäfen und Glasfaserkabel Anschluss. Doch all diese Projekte kosten natürlich Geld.

Die Kosten der Hilfe zur Selbsthilfe

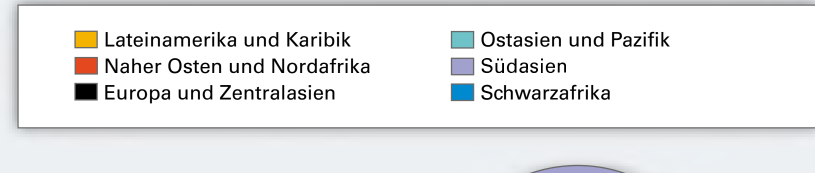
In vielen großen Ländern wie China gibt es prosperierende Regionen, die stagnierende Landesteile zu unterstützen vermögen. Die ostchinesische Küstenregion finanziert umfangreiche öffentliche Investitionen in Westchina. Die meisten der heute erfolgreichen Entwicklungsländer, insbesondere kleinere, erhielten in kritischen Phasen zumindest ein wenig Unterstützung von ausländischen Gebern. Entscheidende wissenschaftliche Grundlagen für die Grüne Revolution wurden von der Rockefeller-Stiftung finanziert, und die Regierungen wohlhabender Geberländer sowie internationale Entwicklungsorganisationen förderten die Verbreitung dieser Anbautechniken in Indien und anderen asiatischen Ländern.

Im Millennium-Projekt der Vereinten Nationen haben wir die Investitionen aufgelistet, mit deren Hilfe die verarmten Weltregionen ihre Grundbedürfnisse nach Gesundheit, Bildung, Wasser, Kanalisation, Nahrungsproduktion, Straßen und anderen wichtigen Gütern zu stillen vermögen. Wir haben die Kosten dieser Hilfe ungefähr beziffert und zudem abgeschätzt, wie viel von den armen Haushalten selbst sowie von einheimischen Institutionen finanziert werden kann. Die übrigen Kosten sind die »Finanzierungslücke«, die internationale Geber schließen müssen.

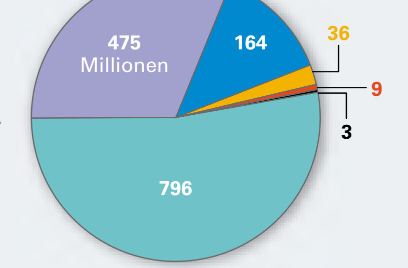
Für das tropische Afrika beträgt die Gesamtinvestition 110 Dollar pro Kopf und Jahr. Zum Vergleich: Das mittlere Pro-Kopf-Einkommen liegt in diesem Teil der Welt bei 350 Dollar jährlich, wovon das allermeiste gerade das nackte Überleben sichert. Demnach überschreitet der gesamte Investitionsbedarf bei Weitem die finanziellen Möglichkeiten dieser Länder. Von den 110 Dollar können vielleicht 40 im Land selbst aufgebracht werden, sodass pro Kopf 70 Dollar in Form internationaler Entwicklungshilfe nötig sind. ▷

Extreme Armut: Trends und Wunschziel

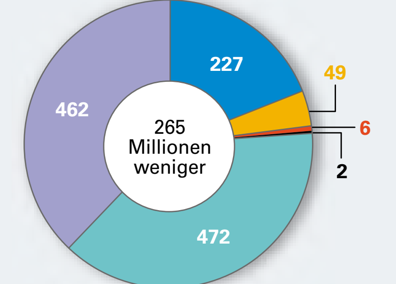
Die Anzahl der extremste Not Leidenden sinkt zwar seit Anfang der 1980er Jahre mit dem Erstarken der Weltwirtschaft, doch die Fortschritte konzentrieren sich auf Ostasien. In Schwarzafrika, in Zentralasien sowie in den Bergregionen Mittelamerikas und der Anden verharren noch immer mehr als eine Milliarde Menschen im Elend. Eine entschlossene Anstrengung, in den nächsten zehn Jahren auch diesen Nachzüglern zu helfen, könnte das Heer der Armen bis 2015 halbieren. Die Zahlen in den Diagrammen bedeuten Millionen Menschen.



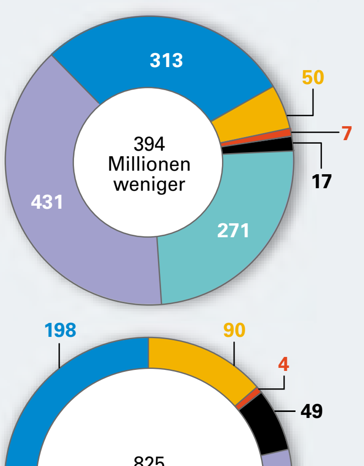
1981: 1,5 Milliarden extrem Arme
Mehr als die Hälfte lebte in Ostasien, mehr als ein Viertel in Südasien.



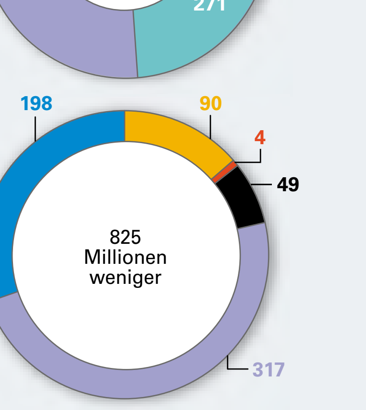
1990: 1,2 Milliarden extrem Arme
In Ostasien schrumpfte die Zahl um 278 Millionen. Wäre die Armutsrate dort nicht gesunken, hätte das Bevölkerungswachstum zusätzlich 285 Millionen bitterarme Menschen geschaffen.



2001: 1,1 Milliarden extrem Arme
Ein globaler Rückgang um 129 Millionen gegenüber 1990, doch in Schwarzafrika stieg die Zahl auf 313 Millionen – fast ein Drittel aller Armen auf der Welt.



2015: 0,7 Milliarden extrem Arme
Mit dem Verwirklichen der Millennium-Entwicklungsziele würden im Jahr 2015 mehr als 500 Millionen Menschen gegenüber 1990 aus extremer Armut befreit und Millionen Leben gerettet.



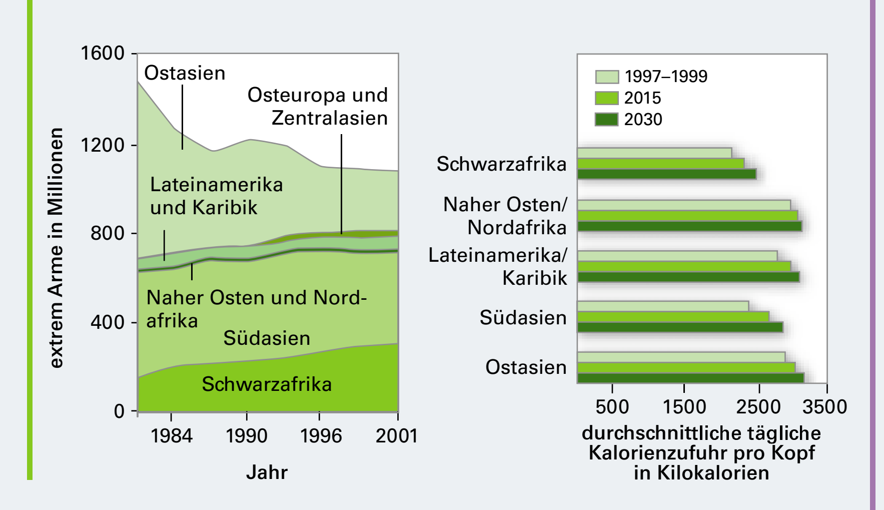
JEN CHRISTIANSEN, NACH: WWW.WORLDBANK.ORG/DATA/WDI2005/WDITEXT/SECTION1_1.HTM

DIE MILLENNIUM-ENTWICKLUNGSZIELE: EINE ZWISCHENBILANZ

Auf dem Millennium-Gipfel der Vereinten Nationen versprach die internationale Staatengemeinschaft, den heute verarmten Regionen finanziell dabei zu helfen, ihre Lebensbedingungen in wichtigen Bereichen wie Gesundheit, Bildung, Wasser, Kanalisation und Nahrungsproduktion zu verbessern. Die UNO verabschiedete acht allgemeine Millennium-Entwicklungsziele, um bis 2015 die extreme Armut weltweit deutlich zu lindern. Die Daten auf dieser Doppelseite verdeutlichen, wie schwierig es ist, diese Ziele zu erreichen. Die Veränderungen messen sich am Stand von 1990.

ZIEL 1: Beseitigung von extremer Armut und Hunger

Zielvorgabe: den Anteil der Menschen halbieren, die von weniger als 1 Dollar pro Tag leben, sowie den Anteil derjenigen halbieren, die chronisch hungern.
Stand: Zwischen 1990 und 2001 stagnierte der Anteil der extrem Armen, die in Schwarzafrika, Lateinamerika und der Karibik leben, nahm aber in Zentralasien sogar zu (die Grafik unten zeigt absolute Zahlen). Die Kalorienzufuhr steigt, doch in mehreren Regionen ist Hunger immer noch weit verbreitet.

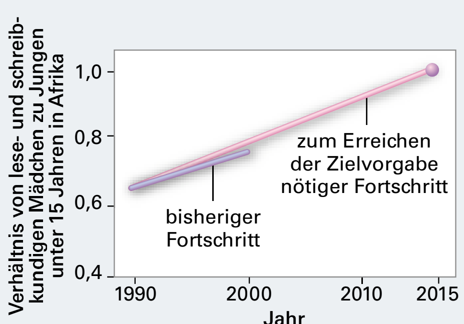


ZIEL 2: Verwirklichung der allgemeinen Grundschulbildung

Zielvorgabe: sicherstellen, dass bis 2015 alle Kinder die Grundschule abschließen.

ZIEL 3: Förderung der Gleichberechtigung und Stärkung der Rolle der Frau

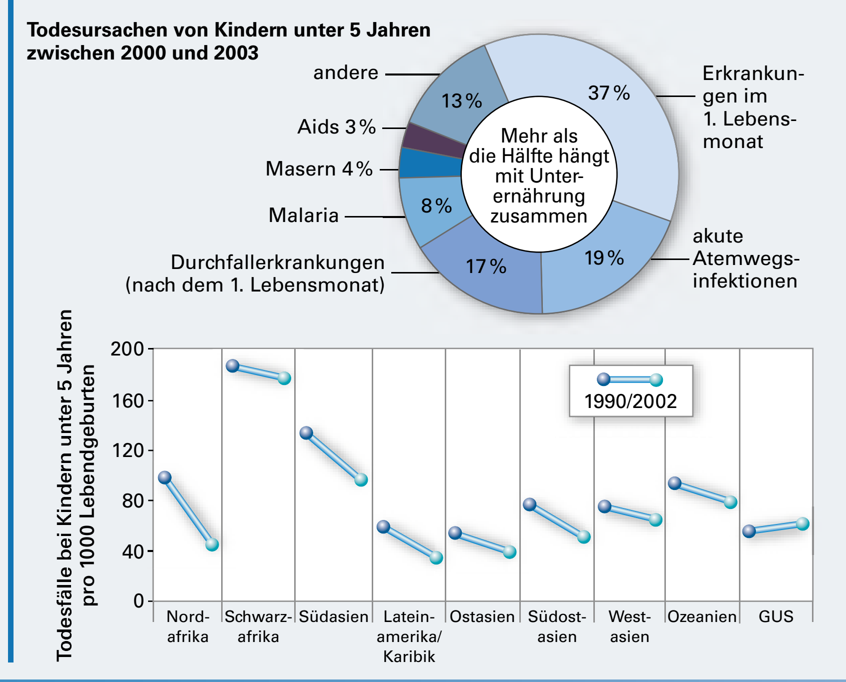
Zielvorgabe: bis 2015 die Benachteiligung von Frauen im primären, sekundären und tertiären Bildungsbereich beseitigen.
Stand: Bildung ist wohl der beste Weg, die Gleichberechtigung zu fördern. Die größten Probleme bietet Schwarzafrika, wo die allgemeine Schulabschlussrate um die 50 Prozent schwankt. Frauen und Mädchen sind noch schlechter dran, wie das zahlenmäßige Verhältnis von lese- und schreibkundigen Mädchen zu Jungen in Afrika zeigt.



ZIEL 4: Senkung der Kindersterblichkeit

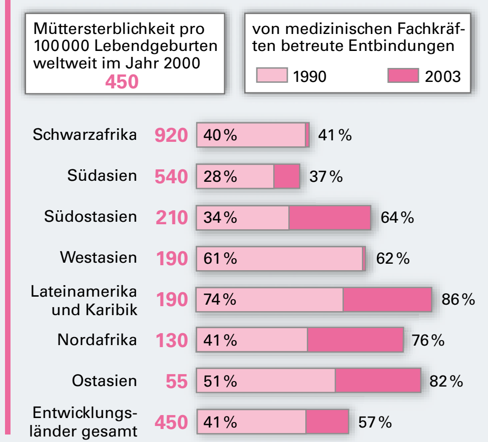
Zielvorgabe: die Sterblichkeitsrate der Kinder unter fünf Jahren um zwei Drittel senken.
Stand: Die Kindersterblichkeit sank in allen Regionen außer den früheren Sowjetrepubliken (Gemeinschaft der Unabhängigen Staaten GUS), doch bleibt sie in Schwarzafrika und Südasien weiterhin hoch. Zum Vergleich: In den reichen Ländern lag die Kindersterblichkeitsrate im Jahr 2000 bei 6 pro tausend Geburten.

Todesursachen von Kindern unter 5 Jahren zwischen 2000 und 2003



ZIEL 5: Verbesserung der Gesundheit von Müttern

Zielvorgabe: bis 2015 die Müttersterblichkeit um 75 Prozent senken.
Stand: Die Müttersterblichkeit ist in sämtlichen Entwicklungsländern nach wie vor erschreckend. Um sie zu senken, muss der Anteil der von medizinischen Fachkräften betreuten Entbindungen erhöht werden.



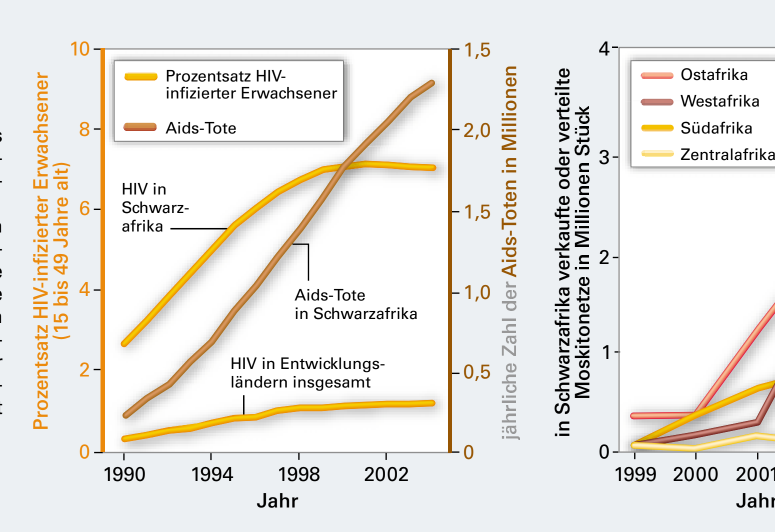
Region	Müttersterblichkeit pro 100000 Lebendgeburten	1990	2003
Schwarzafrika	920	40 %	41 %
Südasien	540	28 %	37 %
Südostasien	210	34 %	64 %
Westasien	190	61 %	62 %
Lateinamerika und Karibik	190	74 %	86 %
Nordafrika	130	41 %	76 %
Ostasien	55	51 %	82 %
Entwicklungsländer gesamt	450	41 %	57 %

JEN CHRISTIANSEN (ILLUSTRATIONEN); SARA BEARDSLEY (DATENSAMMLUNG); QUELLEN: – ZIEL 1: WWW.WORLDBANK.ORG/DATA/WDI2005/WDITEXT/SECTION1_1_1.HTM (GRAFIK); WWW.FAO.ORG/DOCREP/007/Y5650E/Y5650E04.HTM (BALKENDIAGRAMM); – ZIELE 2 UND 3: ACHIEVING THE MILLENNIUM DEVELOPMENT GOALS IN AFRICA, JUNI 2002 (GRAFIK); – ZIEL 4: THE MDG REPORT 2005 (KREISDIAGRAMM); HTTP://UNSTATS.UN.ORG/UNSD/MI/MI_COVERFINAL.HTM (LINIENDIAGRAMM); – ZIEL 5: THE MDG REPORT 2005 (BALKENDIAGRAMM)



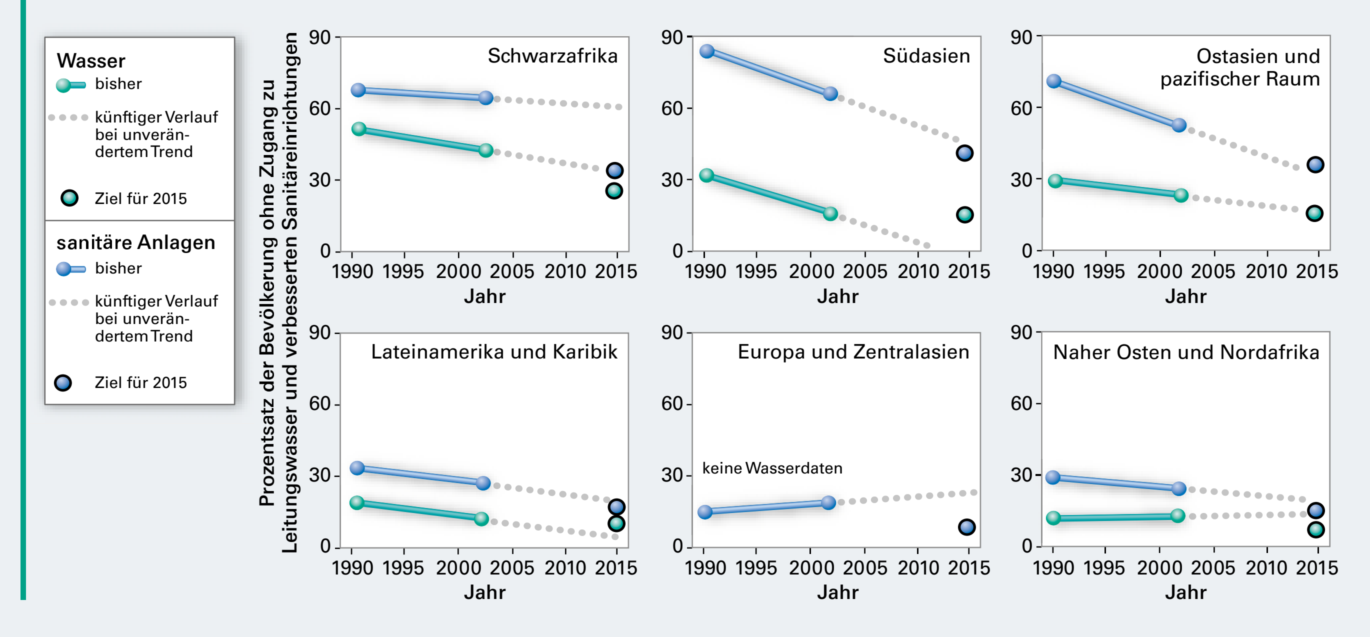
ZIEL 6: Bek mpfung von HIV/Aids, Malaria und anderen Krankheiten

Zielvorgabe: die Ausbreitung von HIV/Aids stoppen und rückgängig machen; die Ausbreitung von Malaria und anderen Krankheiten verlangsamen.
Stand: Gegenwärtig sind etwa 40 Millionen Menschen mit HIV infiziert. Teile Schwarzafrikas sind stark durchseucht und andere Entwicklungsländer ernsthaft bedroht. Die Malaria tötet jährlich rund drei Millionen Menschen, meist in Afrika, vor allem Kinder. In den letzten Jahren wurden mehr Moskitonetze verteilt, doch hunderten Millionen Menschen in Malariagebieten fehlt dieser Schutz nach wie vor.



ZIEL 7: Sicherung der ökologischen Nachhaltigkeit

Zielvorgabe: unter anderem bis 2015 den Anteil der Menschen ohne nachhaltigen Zugang zu sauberem Trinkwasser und einfachen Sanitäreinrichtungen halbieren.
Stand: Mit Ausnahme Schwarzafrikas ist der Zugang zu sauberem Trinkwasser in städtischen Regionen im Allgemeinen relativ gesichert, in ländlichen Regionen jedoch noch eingeschränkt. Der Mangel an sanitären Einrichtungen in Schwarzafrika und in Südasien trägt zu der weiten Verbreitung von Durchfallerkrankungen bei.



ZIEL 8: Aufbau einer weltweiten Entwicklungspartnerschaft

Zielvorgabe: den besonderen Bedürfnissen der am wenigsten entwickelten Länder – einschließlich großzügigerer Entwicklungshilfe – gerecht werden.
Stand: Die reichen Länder haben wiederholt 0,7 Prozent ihres BIP als Entwicklungshilfe zugesagt, doch 17 von 22 Geberländern verfehlen dieses Ziel noch immer. Doch es gibt Fortschritte: Die Länder der Europäischen Union verpflichteten sich kürzlich, die 0,7-Prozent-Marke bis 2015 zu erreichen. Unterdessen behaupten andere Geber, die armen Länder seien zu korrupt, um Wirtschaftswachstum zu erreichen. Die Tabelle rechts widerlegt diesen Mythos: Viele schnell wachsende asiatische Länder gelten als besonders korrupt gegenüber manchen langsam wachsenden Ländern Afrikas.

Korruption und Wirtschaftswachstum

		Rangordnung nach vermuteter Korruption (niedriger bedeutet weniger korrupt)	mittleres Wachstum des BIP pro Kopf und Jahr von 1980 bis 2000
Schwarzafrika	Ghana	70	0,3
	Senegal	76	0,5
	Mali	78	-0,5
	Malawi	83	0,2
Ostasien	Indien	83	3,5
	Pakistan	92	2,4
	Indonesien	122	3,5
	Bangladesch	133	2,0

ZIEL 6: THE MDG REPORT 2005 (GRAFIKEN); – ZIEL 7: GLOBAL MONITORING REPORT 2005, MDG, FROM CONSENSUS TO MOMENTUM (DATEN); – ZIEL 8: GLOBAL CORRUPTION REPORT 2004 VON TRANSPARENCY INTERNATIONAL (TABELLE)

▷ Alles in allem beträgt der Unterstützungsbedarf weltweit rund 160 Milliarden Dollar pro Jahr – das Doppelte des gegenwärtigen Hilfsbudgets der reichen Nationen von 80 Milliarden. Diese Zahl entspricht rund 0,5 Prozent des Bruttoinlandsprodukts (BIP) aller wohlhabenden Geberländer. Darin sind andere humanitäre Projekte wie der Wiederaufbau des Irak oder die Tsunami-Hilfe rund um den Indischen Ozean nicht enthalten. Um auch solche Notfälle abzudecken, sollten 0,7 Prozent des BIP aufgebracht werden – was zwar alle Geberländer seit Langem versprechen, doch nur wenige einlösen. Andere Organisationen wie der Internationale Währungsfonds, die Weltbank und die britische Regierung kommen praktisch zum selben Schluss.

Hilfe statt Almosen

Unserer Ansicht nach könnten die ärmsten Länder mit diesen Investitionen die Armut bis 2015 halbieren und, sofern die Mittel weiter fließen, bis 2025 ganz beseitigen. Das wäre keine »Sozialhilfe« von Reichen für Arme, sondern etwas viel Wichtigeres und Nachhaltigeres. Menschen, die oberhalb des schieren Existenzminimums leben, könnten etwas für ihre Zukunft zurücklegen; sie könnten an der Aufwärtsspirale von steigendem Einkommen, Ersparnissen und Technologie-Import teilhaben. Wir würden einer Milliarde Menschen Hilfe zur Selbsthilfe geben statt Almosen.

Falls die reichen Nationen diese Investitionen nicht aufbringen, werden sie auf praktisch unabsehbare Zeit Notfallhilfe leisten müssen. Sie bleiben konfrontiert mit Hungersnöten, Epidemien, regionalen Konflikten und der Ausbreitung terroristischer Schlupfwinkel. Und sie verurteilen nicht nur die armen Länder, sondern auch sich selbst zu chronischer politischer Instabilität, humanitären Katastrophen und Sicherheitsrisiken.

Gegenwärtig verlagert sich die Debatte von der bloßen Diagnose extremer Armut und vom Kalkulieren finanzieller Bedürfnisse zu der praktischen Frage, wie Unterstützung am besten wirkt. Viele glauben, bisher seien die Hilfsmaßnahmen gescheitert und die Fehler der Vergangenheit dürften sich nicht wiederholen. Manche dieser Bedenken sind durchaus berechtigt, doch andere beruhen auf Missverständnissen.

Entwicklungshilfe: Wohin mit dem Geld?

Hier sind die zur Erreichung der Millennium-Entwicklungsziele nötigen Investitionen für drei repräsentative arme afrikanische Länder aufgeschlüsselt. Der mittlere Unterstützungsbetrag pro Kopf für alle Empfängerländer würde insgesamt rund 110 Dollar jährlich betragen. Diese Investitionen sollten sowohl durch externe Entwicklungshilfe als auch von den Ländern selbst finanziert werden.

Investitionsbereich	Durchschnitt pro Kopf und Jahr von 2005 bis 2015 in Dollar		
	Ghana	Tansania	Uganda
Hunger	7	8	6
Bildung	19	14	15
Gleichberechtigung der Frau	3	3	3
Gesundheit	25	35	34
Wasser- und Sanitärversorgung	8	7	5
Slum-Sanierung	2	3	2
Energie	15	16	12
Straßen	10	22	20
andere	10	10	10
insgesamt	**100**	**117**	**106**

BERECHNET NACH DATEN AUS: INVESTING IN DEVELOPMENT. UN MILLENNIUM PROJECT, EARTHSCAN PUBLICATIONS, 2005. DIE ABGERUNDETEN EINZELPOSTEN SUMMIEREN SICH NICHT EXAKT ZU GESAMTZAHLEN.

Die Reichen oben, die Armen unten wie hier in Mexico City – das beschreibt den Zustand der menschlichen Gesellschaft seit Anbeginn der Zivilisation. Doch aus der Erkenntnis, dass letztlich alle Menschen auf der Erde zutiefst voneinander abhängig sind, folgt, dass niemand – schon gar nicht der Ärmste unter uns – im Stich gelassen werden darf.

Meinungsumfragen zufolge überschätzen US-Bürger die von ihrem Land gewährte Entwicklungshilfe bei Weitem – bis um das Dreißigfache. Da die Öffentlichkeit glaubt, so viel Geld sei geflossen und so wenig damit geschehen, zieht sie den Schluss, diese Programme seien gescheitert. Die Wirklichkeit sieht anders aus. Die offizielle US-amerikanische Entwicklungshilfe für Schwarzafrika (Afrika südlich der Sahara) beläuft sich auf zwei bis vier Milliarden Dollar pro Jahr oder rund drei bis sechs Dollar für jeden Afrikaner. Die Hilfe erfolgt größtenteils als »technische Zusammenarbeit«, die in den Taschen der Berater landet, in Form von Nahrungslieferungen für die Opfer von Hungersnöten sowie als Schuldenerlass. Nur selten lässt diese Form der Hilfe zu, sie in systematische Verbesserungen von Gesundheit, Ernährung, Nahrungsmittelproduktion und Transportwesen zu investieren. Bevor wir urteilen, ob Entwicklungshilfe funktioniert oder nicht, sollten wir ihr eine faire Chance geben.

Ein zweiter gängiger Irrtum betrifft das Ausmaß, in dem das gespendete Geld durch Korruption in dunklen Kanälen versickert. Früher landete es manchmal tatsächlich auf Schweizer Nummernkonten – vor allem dann, wenn die Gelder nicht zu Hilfszwecken flossen, sondern aus geopolitischen Gründen.

Kontrollierte Vergabe

Ein gutes Beispiel ist die Unterstützung der USA für das korrupte Regime von Mobutu Sese Seko in Zaire (heute Demokratische Republik Kongo) während des Kalten Krieges. Verfolgt die Hilfe hingegen nicht politische Absichten, sondern Entwicklungsziele, sind die Ergebnisse günstig; das gilt für die Grüne Revolution, die Ausrottung der Pocken und den fast erreichten Sieg über die Kinderlähmung.

PETER ARNOLD INC, UNEP, GALVAN, MONICA TERRAZAS

Das Hilfspaket, das wir befürworten, soll sich auf Länder mit einigermaßen guter Regierungsführung und wirtschaftlicher Transparenz konzentrieren. In Afrika gehören dazu Äthiopien, Ghana, Mali, Mosambik, Senegal und Tansania. Das Geld soll ihnen nicht einfach vor die Füße geworfen, sondern nach einem detaillierten und kontrollierten Plan vergeben werden. Zusätzliche Finanzierungsrunden darf es erst geben, wenn die Arbeit wirklich getan ist. Ein Großteil der Förderung soll direkt in Dörfer und Städte fließen, um das Risiko, dass die Zentralregierung das Geld beiseite schafft, möglichst klein zu halten. Alle Programme sollen ständig auf ihre Qualität geprüft werden.

In der westlichen Welt betrachtet man Entwicklungshilfe oft als hinausgeworfenes Geld. Doch bei richtiger Verwendung ist sie eine Investition, die sich eines Tages doppelt und dreifach auszahlt – wie die US-amerikanischen Hilfsprogramme für Westeuropa und Ostasien nach dem Zweiten Weltkrieg. Durch unterstützten Aufschwung werden die heute verarmten Länder vom ewigen Almosentropf loskommen. Sie werden zum weltweiten Fortschritt von Wissenschaft, Technik und Handel beitragen. Indem sie politische Stabilität gewinnen, werden sie weniger anfällig für Gewalt, Drogenhandel, Bürgerkrieg oder gar terroristische Machtübernahme. Das wird nicht zuletzt unsere eigene Sicherheit stärken. UN-Generalsekretär Kofi Annan brachte das vor kurzem auf die prägnante Formel: »Es gibt keine Entwicklung ohne Sicherheit und keine Sicherheit ohne Entwicklung.« ◁

AUTOR UND LITERATURHINWEISE



Jeffrey D. Sachs leitet das Earth Institute an der New Yorker Columbia-Universität und das Millennium-Projekt der Vereinten Nationen. Als Wirtschaftsexperte hat er Regierungen in Lateinamerika, Osteuropa, der ehemaligen Sowjetunion, Asien und Afrika bei ihren Reformen beraten. Als Mitarbeiter internationaler Institutionen setzt er sich für die Bekämpfung von Armut und Krankheit ein sowie für den Schuldenerlass zu Gunsten armer Länder.

Das Ende der Armut. Ein ökonomisches Programm für eine gerechtere Welt. Von Jeffrey D. Sachs. Siedler, München 2005

The Development Challenge. Von Jeffrey D. Sachs in: Foreign Affairs, Bd. 84, S. 78 (2005)

Weblinks zu diesem Thema finden Sie bei www.spektrum.de unter »Inhaltsverzeichnis«.

Die große Chance der Kleinbauern

Günstige Bewässerungssysteme und der Zugang zu Märkten verhelfen Kleinbauern der Dritten Welt zu mehr Ertrag und eigenem Einkommen – und damit aus der Armut.

Von Paul Polak

Als ich Peter Mwete vor drei Jahren zum ersten Mal traf, jätete er seinen gerade einmal 100 Quadratmeter großen Gemüsegarten. Er lebte zusammen mit seinem Vater und dem 19-jährigen Bruder in Mari-Mari, einem Dorf in Simbabwe. Die Mutter war dem HI-Virus erlegen und sein ebenfalls infizierter Bruder rang mit dem Tod. Neben der Trauer schmerzte auch der Verlust zweier tatkräftiger Helfer im Kampf ums Überleben. Um seine Familie dennoch ernähren zu können, hatte Peter schon vor einiger Zeit ein günstiges und einfaches System zur Tröpfchenbewässerung installiert. Es wurde von International Development Enterprises (IDE) vertrieben, jener Organisation, die ich 1981 gegründet hatte.

In der Mitte eines jeden erhöhten Beets stand damals ein 40-Liter-Kanister auf einem Holzgerüst. Von dort aus floss das Wasser über eine verschiebbare Lochleitung und tropfte nach und nach direkt an die Wurzeln der einzelnen Pflanzen. Dieses Verfahren war weitaus effizienter als das herkömmliche Gießen mit Wassereimern. So erntete der Bauer auf seinem kleinen Fleckchen Erde mehr als seine Familie brauchte. Den Überschuss wollte er für zirka 90 Dollar verkaufen – ein beachtliches Einkommen für einen Landwirt in Simbabwe. Für das kommende Jahr strebte Peter Mwete eine Verdreifachung seines Gewinns an. Dazu wollte er die Anbaufläche verdoppeln und einen Teil des Blattgemüses durch einträglichere Pflanzen wie Tomaten und Kartoffeln ersetzen. Zusätzlich plante er, den Ertrag durch Düngen zu steigern, aber Mineraldünger sprengte sein Budget. Die Alternative sollte eine Art Düngetee sein: Ein Leinensack mit Kuhdung wird in ein Wasserfass getaucht, die resultierende Nährlösung lässt sich leicht mittels der Lochleitung verteilen.

Ganz ähnliche Erfahrungen machten Tausende von Kleinbauern in der Dritten Welt, mit denen ich in den letzten 30 Jahren sprach. Sie können durch Intensivanbau von Obst und Gemüse auf einem 1000 Quadratmeter großen Feld bis zu 500 Dollar jährlich erwirtschaften. Voraussetzung: bessere Anbaumethoden, erschwingliche Bewässerung und Zugang zu Absatzmärkten. Sie helfen dabei, eine der großen globalen Herausforderungen bis 2050 zu bewältigen: weltweit neun Milliarden Menschen zu ernähren, also drei Milliarden mehr als heute, ohne den Flächen- und Wasserbedarf übermäßig zu steigern.

Das kostbare Nass ist der Schlüssel zu höheren Erträgen und damit auch zur Bekämpfung der weltweiten Armut. Knapp 1000 Liter reichen gerade einmal für die Produktion eines Kilogramms Getreide. Daher gilt es, mehr Wasser für Bewässerungszwecke zu speichern und

DIE WASSER- UND LANDWIRTSCHAFTSFRAGE

Das Problem

▶ Obwohl die grüne Revolution die weltweiten Getreideerträge signifikant erhöht hat, halten sich Hunger und Armut hartnäckig in weiten Teilen von Asien, Afrika und Lateinamerika. Bauern bewirtschaften kleine Felder unter Grenzbedingungen und können ihre Familien damit nicht ausreichend ernähren.

▶ Allein in Schwarzafrika vegetieren mehr als 300 Millionen Menschen mit höchstens einem Dollar pro Tag. In Indien sind mehr als 200 Millionen Menschen unzureichend ernährt.



Anbau von vermarktungsfähigem Gemüse

IDE (INTERNATIONAL DEVELOPMENT ENTERPRISES)

Der Plan

▶ Eine Steigerung der Produktivität von Großfarmen wird die weltweite Versorgung mit Nahrung verbessern, aber die Bekämpfung der Armut sollte sich auf die Einkommenssituation bei Kleinbauern konzentrieren.

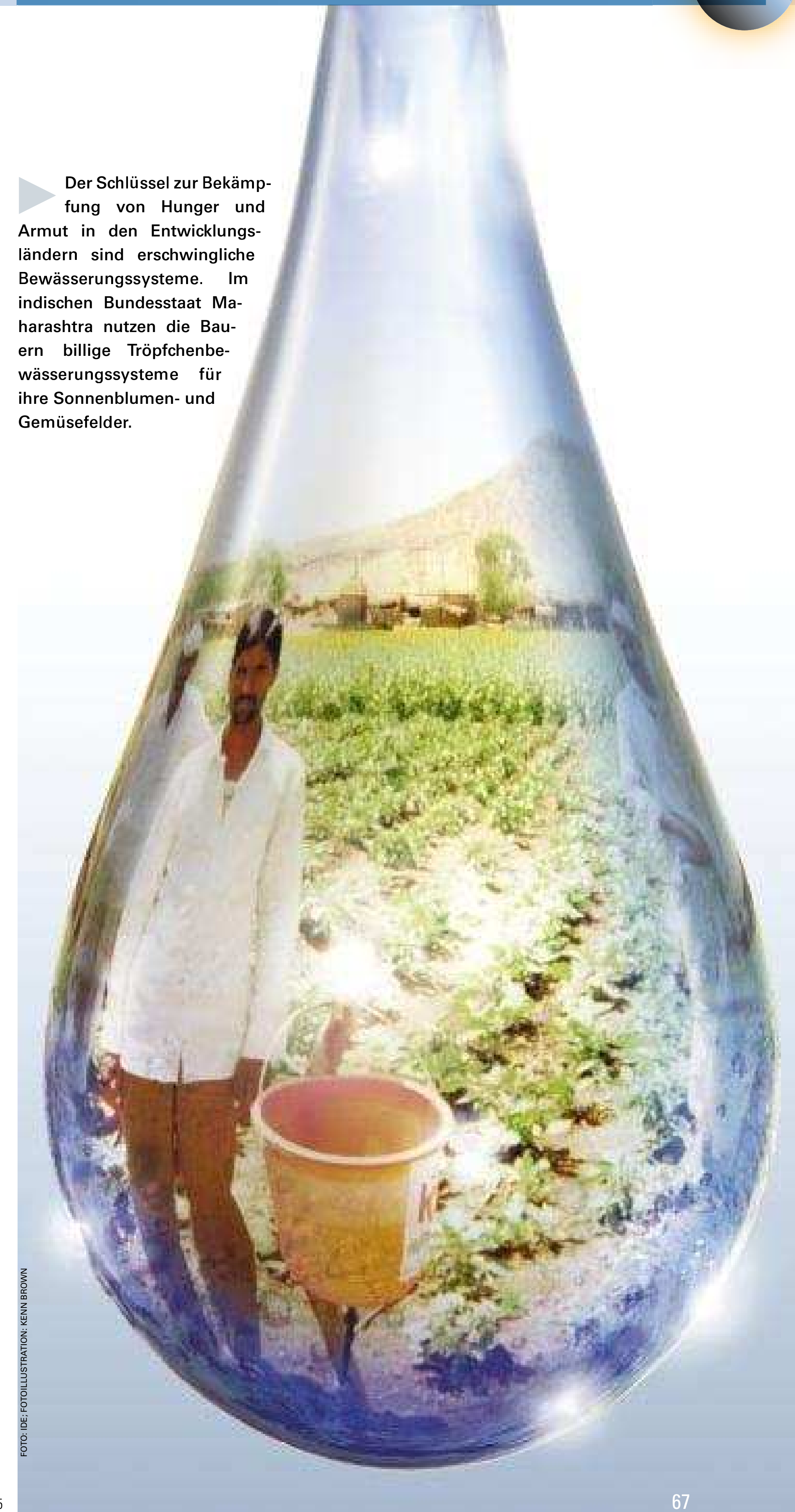
▶ Individuell angepasste Bewässerungssysteme aus kostengünstigen Materialien, wie etwa Lochschläuchen und Wasserkanistern, ermöglichen auf kleinen Feldern enorme Ertragssteigerungen. Durch den Anbau von einträglichem Gemüse, wie Tomaten und Chilis, können die Bauern ihren Verdienst um bis zu 500 Dollar pro Jahr erhöhen.

das vorhandene effektiver zu nutzen. Regierungen und Entwicklungshilfeorganisationen versuchten, diesen Problemen meist mit Großprojekten zu begegnen: gigantischen Staudämmen, ausgedehnten Bewässerungskanälen und riesigen neuen Anbauflächen für eigens gezüchtete Hochertragssorten. Diese Strategie gründet auf der »grünen Revolution«, einer 1944 begonnenen sehr erfolgreichen Kampagne zur Steigerung der Getreideerträge in Entwicklungsländern. Doch die Stauseen füllten sich teilweise zu schnell mit Schlamm. Infolgedessen sank ihre Speicherkapazität; den Bauern im Tal fehlten außerdem die fruchtbaren Sedimente als natürlicher Dünger. Vielerorts schädigten konventionelle Bewässerungstechniken die Böden.

Durstige Äcker

Mehr noch: Trotz weltweit stark gestiegener Agrarproduktivität hält sich in weiten Teilen von Afrika, Asien und Lateinamerika hartnäckig die Armut (siehe den vorherigen Beitrag dazu ab S. 56). Für die Zukunft mögen daher weitere Verbesserungen der landwirtschaftlichen Großproduktion zwar die Hauptrolle spielen, um die Nahrungsmenge nochmals gewaltig zu steigern. Um Menschen aber aus ihrer Armut herauszuhelfen, dürften kleine, individuelle Bewässerungssysteme der bessere Weg sein.

Mittlerweile entfällt auf die Landwirtschaft fast 70 Prozent des menschlichen Wasserverbrauchs. Mit der grünen Revolution erweiterte sich die bewässerte Anbaufläche von 100 Millionen Hektar im Jahr 1950 auf 276 Millionen Hektar heute. Dank des Anstiegs der Erntemengen sanken die Preise für Nahrungsmittel. Das reduzierte zwar die Armut der Stadtbevölkerung und der Bauern in Subsistenzwirtschaft, doch diesen Effekt fraß das Bevölkerungswachstum wieder auf. Zwischen 1990 und 2001 sank so die Zahl der in extremer Armut lebenden Menschen – sie verfügen über maximal einen Dollar pro Tag – weltweit von 1,22 auf 1,09 Milliarden; aber die Zahl derer, die weniger als zwei Dollar pro Tag verdienen, stieg im gleichen Zeitraum von 2,65 auf 2,74 Milliarden. Nun ging es ▷

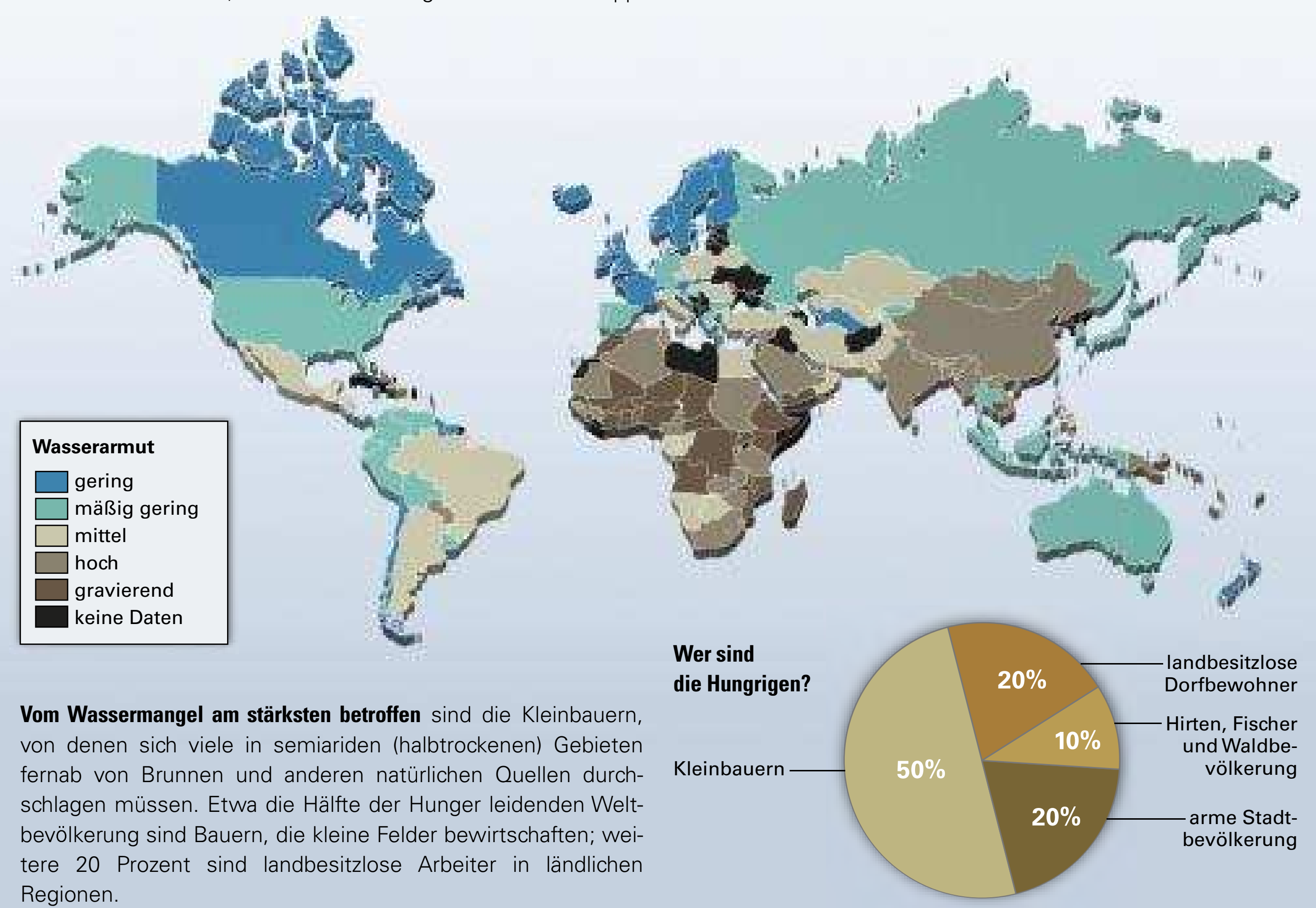


▶ **Der Schlüssel zur Bekämpfung von Hunger und Armut in den Entwicklungsländern sind erschwingliche Bewässerungssysteme. Im indischen Bundesstaat Maharashtra nutzen die Bauern billige Tröpfchenbewässerungssysteme für ihre Sonnenblumen- und Gemüsefelder.**

FOTO: IDE; FOTOILLUSTRATION: KENN BROWN

Wasser und Armut

Lebenswichtig für eine funktionierende Landwirtschaft ist Wasser. Daher wurde sein Mangel zu einer der wichtigsten Ursachen für die Armut in den Entwicklungsländern. Forscher des Zentrums für Ökologie und Hydrologie im englischen Wallingford haben einen Index entwickelt, der die Auswirkungen der Wasserknappheit verdeutlicht. Er setzt sich aus Daten zu Wasserverfügbarkeit und -zugang sowie zu Wasserverbrauch und -qualität zusammen. Der größte Mangel herrscht demnach in Schwarzafrika, aber auch in China, Indien und Bangladesch gibt es große Probleme.



Vom Wassermangel am stärksten betroffen sind die Kleinbauern, von denen sich viele in semiariden (halbtrockenen) Gebieten fernab von Brunnen und anderen natürlichen Quellen durchschlagen müssen. Etwa die Hälfte der Hunger leidenden Weltbevölkerung sind Bauern, die kleine Felder bewirtschaften; weitere 20 Prozent sind landbesitzlose Arbeiter in ländlichen Regionen.

LANDKARTE: BRYAN CHRISTIE DESIGN, NACH: CENTER FOR ECOLOGY AND HYDRALOGY, C.A. SULLIVAN & J.R. MEIGH; KREISDIAGRAMM: JEN CHRISTIANSEN

▷ bei der grünen Revolution nicht darum, das Einkommen der armen Landbevölkerung zu steigern, sondern generell die Nahrungsmittelproduktion. Welche Schieflage mit dieser bisherigen Strategie aber entstehen kann, demonstriert das Beispiel Indien. Der Subkontinent versorgt sich seit 15 Jahren selbst mit Nahrungsmitteln. Aber trotz voller Kornkammern haben mehr als 200 Millionen Inder, ein Fünftel der Bevölkerung nicht ausreichend zu essen. Denn sie können sich die nötigen Lebensmittel nicht leisten und die sozialen Sicherungssysteme des Landes sind mangelhaft.

Das oberste der acht Millenniumsentwicklungsziele ist, die Zahl der extrem Armen und ständig Hunger Leidenden bis 2015 zu halbieren (siehe Kasten S. 62–63). Doch mit dem üblichen Vorgehen dürften auch die meisten anderen Ziele kaum zu erreichen sein – gleichgültig wie viel Geld die reichen Länder dafür aufbringen.

Gleich drei Vorteile

Der amerikanische Agrarforscher Norman Borlaug – er erhielt 1970 den Friedensnobelpreis für seine Verdienste im Rahmen der grünen Revolution – wurde jüngst gefragt, was die reichen Länder tun sollten, um den Hunger in der Welt zu bekämpfen. Seine überraschende Antwort: nur in Notlagen Lebensmittelhilfe leisten. Die langfristige Lösung bestehe darin, die landwirtschaftlichen Produktionssysteme zu verändern, insbesondere bei Bauern in Subsistenzwirtschaft. Dies würde nicht nur die Nahrungsmenge erhöhen, sondern auch Arbeitsplätze schaffen und die Armut bekämpfen – durch den Erlös aus Ernteüberschüssen.

Nach dem Prinzip der grünen Revolution Getreideerträge zu steigern, dürfte aber Bauern in Subsistenzwirtschaft angesichts der Weltmarktkonkurrenz nichts helfen. Eine Familie bewirtschaftet in Indien durchschnittlich weniger als 16 200, in Bangladesch etwa die Hälfte und in China nur rund 2000 Quadratmeter. Zum Vergleich: ein Hektar sind 10 000 Quadratmeter. Der Einsatz moderner Geräte wie Mähdrescher ist hier zu teuer und nicht praktikabel. Ein indischer Kleinbauer, der den Weizenüberschuss von einem knappen halben Hektar seines Landes verkaufen will, kommt ver-

mutlich gegen die Konkurrenz aus Übersee nicht an: die hoch effizienten, stark subventionierten kanadischen Großweizenfarmen. Subsistenzbauern sollten vielmehr ihre Stärke ausspielen: nämlich ihre einzigartig billige Arbeitskraft. Dann hätten sie einen vergleichbaren Vorteil beim Erzeugen und Verkauf von arbeitsintensiven Agrarprodukten.

1981 erfuhr ich selbst aus erster Hand, welche Vorteile eine solche Entwicklungshilfe im kleinen Maßstab haben kann. Damals traf ich Abdul Rahman, einen Bauern im Noakhali-Distrikt von Bangladesch. Auf seinen nur vom Regen bewässerten 3000 Quadratmetern Land erntete er lediglich 700 Kilogramm Reis pro Jahr – 300 Kilogramm weniger, als seine Familie benötigte. In den drei Monaten vor der herbstlichen Ernte litt sie Hunger. Während wir seine verstreut liegenden Felder besichtigten, fragte ich ihn, was er bräuchte, um der Armut zu entfliehen. »Eine geregelte Bewässerung für meine Felder«, antwortete er, »aber zu einem Preis, den ich mir leisten kann.«

Als simple Lösung für Abduls Probleme erwies sich eine Tretpumpe, entwickelt in den späten 1970er Jahren von dem norwegischen Ingenieur Gunnar Barnes. Sie wird von einer einzigen Person betrieben, die sozusagen auf der Stelle läuft. Über zwei Pedale und Metallkolben erzeugt sie den nötigen Druck, um Wasser an die Oberfläche zu pumpen (siehe Foto S. 70). Die Pedale werden aus Bambus oder einem anderen vor Ort verfügbaren Material gefertigt. Eine solche Pumpe reicht für 2000 Quadratmeter Gemüse und kostet nur 25 Dollar, inklusive der Installationskosten für das Anzapfen des Grundwassers. Abdul hatte über einen Vetter davon gehört. Den von einem Onkel bekommenen Kredit zahlte er bereits nach vier Monaten zurück.

Während der fünfmonatigen Trockenzeit in Bangladesch, wenn die Landwirtschaft normalerweise fast zum Erliegen kommt, benutzte er seine Tretpumpe und baute auf einem Drittel seiner Fläche Chili, Tomaten, Kohl und Auberginen an. Einen Teil des Gemüses aß die Familie selbst, den Rest verkaufte sie auf dem lokalen Markt und erzielte einen Nettoverdienst von 100 Dollar. Mit Hilfe dieser neuen Einkommensquelle konnte sie Reis kaufen, bald auch ein paar Hühner und ein Kalb anschaffen. Mehr noch: Abdul vermochte seine zwei Söhne bis zum 16. Lebensjahr in die Schule zu schicken und eine kleine Mitgift für seine Tochter zu sparen.

Bangladesch ist prädestiniert für den Einsatz von Tretpumpen, denn nur wenige Meter unter der Oberfläche liegt ein riesiges Grundwasserreservoir. In den frühen 1980er Jahren begann IDE deshalb dort eine Kampagne für den Einsatz dieser Technik. Mit Erfolg: 75 kleine Privatfirmen stellten die Geräteteile her, tausende Händler verkauften die Pumpen auf den Dörfern und Brunnenbohrer schlossen sie an.

Eine wahre Erfolgsgeschichte

In den folgenden zwölf Jahren rüsteten 1,5 Millionen Kleinbauern ihre Felder damit aus und steigerten dadurch ihr Nettojahreseinkommen um 150 Millionen Dollar. Die Vermarktungskampagne selbst kostete IDE nur zwölf Millionen, die Landwirte investierten 37,5 Millionen Dollar in das Projekt. Hingegen hätte eine Bewässerung derselben Fläche mittels Dämmen und Kanälen 1,5 Milliarden verschlungen.

Was die Reduktion der Armut anbelangt, erwies sich das einfache System den kostspieligeren Versionen überlegen, welche die Weltbank seit den 1970er Jahren durch zinsgünstige Kredite in Bangladesch unterstützte. Die Regierung importierte Dieselpumpen für Tief- und Flachbrunnen und stellte sie den Bauern zur Verfügung. Die Weltbank wertete das Programm als Erfolg, da das Land nun seinen Reisbedarf besser decken konnte. Als die staatliche Unterstützung aber auslief, gaben die Bauern die Tiefbrunnen wegen der hohen Betriebskosten meist auf. Flachbrunnen blieben bei größeren, reicheren Landbesitzern im Einsatz, die damit die Hoheit über das Wasser erlangten. Viele arme Bauern hatten das Nachsehen.

Der Kostenvergleich für die Bewässerung von rund einem halben Hektar spricht für sich: 66 Dollar bei einer Tretpumpe (wovon 50 Dollar der Besitzer aufbrachte) gegenüber dem mehr als doppelten oder gar sechsfachen Betrag bei Flachbrunnen- beziehungsweise Tiefbrunnenpumpen. Durch Konzentration auf Nachhaltigkeit erzeugt das Tretpumpenprojekt mehr Einkommen bei weniger Umweltbelastung.

Nun ist ein ähnlicher Ansatz gefragt, um ein anderes großes Problem in Bangladesch anzugehen: der gefährliche natürliche Arsengehalt im dortigen Grundwasser. Viele Bewohner können die sieben Dollar für einen Trinkwasserfilter aufbringen. Die nahe liegende Lösung also: wieder privatwirtschaftliche Vertreiber zu finden sowie finanziell jene Menschen zu unterstützen, die sich den Filter nicht leisten können. Wir von IDE werben gerade dafür. Wie üblich aber, rufen Regierungen und Gebergemeinschaften nach großen Lösungen wie zentralen Wasserleitungssystemen. Das hat sich aber in der Vergangenheit des Landes als nicht effektiv erwiesen.

Die Gewinnung des Wassers aus Brunnen oder Reservoiren ist indes nur eine Seite des Problems. Es bedarf auch besserer Bewässerungsverfahren. In Entwicklungsländern werden seit Jahrhunderten meist einfach die Felder geflutet. Als Folge gingen bereits Millionen Hektar gutes Ackerland verloren: Die Böden ▷

Bewässerung in kleinem Maßstab

1 500 000
Zahl der Bauern in Bangladesch, die Tretpumpen erworben haben

49,5 Millionen Dollar
Gesamtinvestition für die Pumpen

150 Millionen Dollar
Gesamtanstieg des bäuerlichen Jahreseinkommens

1,5 Milliarden Dollar
Kosten für die Bewässerung derselben Agrarfläche mit konventionellen Staudämmen und Kanälen

▷ sind ausgelaugt und versalzen, die Grundwasserspeicher erschöpft.

Die ärmsten der Bauern kämpfen überdies mit weiteren Problemen: Viele von ihnen wirtschaften auf gerade noch nutzbaren Ackerflächen in semiariden Gebieten (halbtrockene Regionen mit jährlich zwischen 20 und 400 Liter Regen pro Quadratmeter). Einige haben nur eingeschränkten Zugang zu Oberflächenwasser oder Brunnen, andere sind ausschließlich vom Regen abhängig. Eines der sparsamsten Verfahren, die Tröpfchenbewässerung, wäre für diese Menschen eine perfekte Lösung – aber leider sind die meisten Systeme zu groß, zu kompliziert und zu teuer.

2001 führte IDE ein System ein, das nur ein Fünftel der konventionellen Anlagen kostet und in siebenjähriger Entwicklungszeit auf die Bedürfnisse von Subsistenzbauern zugeschnitten wurde. Peter Mwete aus Simbabwe ist einer der Nutznießer. Familien können für bereits drei Dollar eine Grundausstattung erwerben, die 40 Quadratmeter Land versorgt; reinvestieren sie einen Teil der zu erwartenden 300-prozentigen Gewinnsteigerung, lässt sich die bewässerte Fläche auf ein Mehrfaches ausdehnen. Im vergangenen Jahr erwarben indische Bauern Ausrüstung zum Bewässern von 8000 Hektar. Innerhalb von zehn Jahren könnten dank den IDE-Systemen allein auf dem Subkontinent mehrere Millionen Hektar in den Genuss der Tröpfchenbewässerung kommen – mehr als zurzeit weltweit mit derartigen Anlagen.

Tretpumpen wurden von vielen Kleinbauern in Bangladesch und Indien angenommen, da sie nur 25 Dollar kosten. Eine Familie kann mit Hilfe der Bewässerung schon im ersten Jahr das Mehrfache verdienen – und das nur durch den Verkauf der Gemüseernte eines 2000 Quadratmeter kleinen Ackers. Diese indische Familie baut beispielsweise Peperoni an. Die Tretpumpe eignet sich gut für Regionen mit hohem Grundwasserspiegel.



IDE

Tropfen statt Fluten

Für die ländlichen Gebiete Ostafrikas und Südasiens entwickeln wir derzeit außerdem eine Möglichkeit, diese Bewässerungssysteme mit Monsunregen zu speisen: In kleinen Sedimentierungsteichen soll sich Oberflächenwasser sammeln und Schlamm absetzen; das Wasser wird dann in derzeit getesteten 10 000-Liter-Tanks zu 40 Dollar das Stück gespeichert. In den Monaten nach der Regenzeit pumpen die Farmer das Wasser per Hand in die Lochleitungen. Mit der Ernte erzielen sie dann in der Trockenzeit hohe Preise auf dem Markt.

Mit kleineren Speichern ließen sich auch schon bestehende Bewässerungskanäle besser nutzen. Normalerweise erhalten die Bauern alle zwei bis drei Wochen das kostbare Nass durch einen Kanal und fluten dann ihre Felder – zu selten für die meisten einträglichen Nutzpflanzen. Diese benötigen alle zwei bis vier Tage Wasser, was mit kleinen Sammeltanks (für Tropfschläuche oder Regner) entlang den Kanälen kein Problem wäre. Abgesehen von einer Steigerung der Ernteerträge wächst auch der Verdienst pro eingesetztem Liter. Zusätzlich werden die Böden geschont, denn Fluten im großen Stil fördert Auslaugung und Versalzung. Bauern in China haben dieses Prinzip bereits erfolgreich übernommen.

Das zur Bewässerung bereits vorhandene Wasser effizienter zu nutzen, etwa durch Tropfschläuche, ist allerdings nur ein Weg, mehr Nahrung für die wachsende Menschheit zu erzeugen. Schon jetzt brauchen Bauern rund 2500 Kubikkilometer Wasser jährlich und selbst bei produktiverer Nutzung werden nach einhelliger Meinung bis 2025 noch rund 20 Prozent mehr nötig sein.

Was große Staudammprojekte anbelangt, so bin ich ein ausgesprochener Gegner, wenn sie hirnlos angelegt sind. Sorgfältige Planung ist gefragt. So veröffentlichte kürzlich die internationale Staudamm-Kommission (World Commission on Dams) einen umfassenden Bericht mit Vorschlägen, derartige Anlagen umweltverträglicher zu gestalten und zu betreiben. Zugleich befürwortete sie die Prüfung von Alternativen zu konventionellen Dämmen, wie das Speichern im Untergrund, was Verdunstungsverluste reduziert und Wasser dort bereitstellt, wo es gebraucht wird.

Auch große offene Sammelbecken können dafür durchaus sinnvoll sein: nämlich um das ausgebeutete Grundwasservorkommen wieder aufzufüllen. Vielerorts auf der Erde sinkt der Spiegel um zwei Meter und mehr pro Jahr. Im indischen, meist trockenen Bundesstaat Gujarat überzeugte der hinduistische Religionsführer Swadhyaya Pariwar in den 1980er Jahren tausende Bauern, Kanäle zu bauen, die die Wasserfluten des Monsuns in große, offene Brunnenbecken leiten. Diese Gemeinschaftsaktion füllt nun alljährlich das Grundwasser wieder auf und erhöht die landwirtschaftliche Produktivität signifikant und nachhaltig.

Eines der weiteren Millenniumsentwicklungsziele lautet: bis 2050 die Hälfte der Menschen, die noch kein sauberes Trinkwasser haben, damit zu versorgen. Neue Bewässerungssysteme könnten das für viele der 1,1 Milliarden Menschen mit leisten, von denen 80 Prozent in armen ländlichen Gebieten leben. Sie alle über ausgedehnte, zentralisierte Wasserleitungen zu versorgen, ist nicht praktikabel und würde Abermilliarden Dollar verschlingen. In Nepal erprobt IDE daher ein Kombisystem: eine kleine Trinkwasserversorgung für acht Dörfer aus sauberen Quellen, die zugleich auch genügend für eine Tröpfchenbewässerung von Gemüse in Trockenzeiten liefern. Durch den Erlös dürfte sich das System in spätestens zwei Jahren amortisiert haben und weiterhin Zusatzeinkünfte ermöglichen.

In weiten Teilen Afrikas entnehmen die Dorfbewohner ihren kompletten Wasserbedarf aus nahe gelegenen Brunnen. Wegen des tieferen Grundwasserspiegels reichen einfache Tretpumpen nicht aus. Handpumpen verschlingen aber 1500 Dollar für die Installation.

Die Geräte selbst werden teilweise gespendet. Doch auch durch eine Kooperative zur Wassernutzung vermag ein 30-Familien-Dorf eine Pumpe zu betreiben. Mit geringem jährlichen Aufwand lassen sich Überschüsse produzieren und der 1500-Dollar-Kredit kann in wenigen Jahren zurückgezahlt werden.

Regierungen und Entwicklungsbehörden können solchen Kooperativen unter die Arme greifen, indem sie deren Organisation fördern, die Bauern anleiten und ihnen die Vermarktung ihrer Erzeugnisse erleichtern. Diese Strategie ist viel effektiver, als bloß die Installationskosten zu bezuschussen. Die Dorfbewohner werden ihre Pumpen eher in Schuss halten, wenn sie ihr Eigentum sind. Dieser Ansatz mag natürlich nicht bei jedem Dorf funktionieren, weil etwa die Brunnen nicht genügend liefern, um auch die Felder zu bewässern. Aber meines Erachtens lassen sich mindestens die Hälfte der neuen ländlichen Trinkwassersysteme selbst finanziert erstellen.

Milliarden Menschen ernähren

Wagen wir eine Bilanz zum ersten Millenniumsziel: Weitere drei Milliarden Menschen zu ernähren und zugleich die weltweite Armut zu halbieren – was wird das kosten? Man kann nur eine auf Erfahrung basierende Vermutung anstellen. Um auf größeren Farmen mit guten Böden, wo bisher der meiste Zuwachs an landwirtschaftlicher Produktivität erzielt wurde, die Ernteerträge weiter zu steigern, sind in den kommenden zehn Jahren, schätze ich, 20 Milliarden Dollar nötig. Davon wird die Hälfte in Forschungsvorhaben der Universitäten, der nationalen Institute sowie der Zentren für internationale Agrarforschung fließen. Die übrigen zehn Milliarden müssen investiert werden, um die Produktivität der bereits existierenden Bewässerungssysteme zu verdoppeln und einige wenige große Staudämme zu bauen.

Armut zu bekämpfen ist aber weitaus schwieriger als nur die Nahrungsmittelproduktion anzukurbeln. Entsprechend gehen die finanziellen Kalkulationen für ein Erreichen der Jahrtausend-Entwicklungsziele weit auseinander. So fordern Jeffrey D. Sachs, Autor des vorhergehenden Artikels, und sein Expertenkomitee der Vereinten Nationen, dass die reichen Länder in den nächsten zehn Jahren insgesamt mehr als 1,5 Billionen Dollar zur Unterstützung der Entwicklungsländer aufbringen. Der Löwenanteil sei für die Verbesserung der Infrastruktur in Gesundheit, Ausbildung, Energie und Straßenbau erforderlich.



▶ Tröpfchenbewässerung spart kostbares Nass. Die Organisation IDE konnte das System durch billige Plastikschläuche erschwinglich machen. Das Wasser wird über einfache, verschiebbare Lochleitungen sehr effektiv direkt an die Pflanzenwurzeln geleitet.

IDE

Auf Grund meiner langjährigen Arbeit mit IDE komme ich zu einem ganz anderen Schluss. Auch wenn Investitionen der Industrieländer unverzichtbar sind, um den Entwicklungsprozess anzuschieben, ist es ebenso essenziell, dass die Betroffenen selbst Zeit und Geld investieren, um ihre Lebensbedingungen zu verbessern. Entscheidend ist, den Unternehmergeist der Einheimischen zu wecken. Glücklicherweise sind bereits Bauern mit Feldern von 4000 Quadratmetern in ihrem Land wichtige Unternehmer. An ihrer Existenz hängen Tausende weiterer Arbeitsplätze, wie die der Einzelhändler oder Werkstätten.

In den vergangenen Jahren haben unsere Projekte das jährliche Nettoeinkommen von mehr als 100 000 armen Bauernfamilien um jeweils 500 Dollar gesteigert, mit Hilfe von weniger als 200 Dollar Investition pro Familie. Sofern diese Dynamik anhält, würden die Milleniumssziele, ungefähr 600 Millionen Menschen (rund 100 Millionen Familien) bis 2015 aus der Armut zu befreien, 20 Milliarden Dollar kosten. Diese Investition deckte zwar nicht all die Verbesserungen der Infrastruktur ab, die Sachs und seine Kollegen fordern; aber sie würde den Familien auf dem Land neue Einkommensquellen erschließen und es ihnen ermöglichen, ihre Kinder auszubilden, gesünder zu leben sowie Haus und Hof besser zu bewirtschaften. Darüber hinaus bin ich überzeugt, dass solche Initiativen auch dazu führen, die weiterverarbeitende Industrie in Schwung zu bringen. Sortieren, Konservieren und Verpacken sowie der Versand von Tomaten, Auberginen, Chili und anderer Agrarprodukte kann dann vor Ort erfolgen.

Wenn allein eine kleine Organisation wie IDE mit einem jährlichen Budget von gerade einmal zehn Millionen Dollar und nur 600 Mitarbeitern es schafft, pro Jahr fast einer Million Menschen über die Armutsgrenze zu helfen, was können dann erst die gebündelten Anstrengungen der Industrienationen bewirken? Aber Entwicklungshilfe muss ganz unten beginnen, bei den Kleinbauern mit den Tretpumpen, und sich dann langsam hocharbeiten. ◁

AUTOR UND LITERATURHINWEISE



Paul Polak ist Gründer und Präsident von International Development Enterprises (IDE), einer gemeinnützigen Organisation in Lakewood im US-Bundesstaat Colorado, die seit 1981 mehr als zwölf Millionen Kleinbauern aus der Armut geholfen hat. Vor seinem Engagement bei IDE war Polak Unternehmer und Psychiater.

The world's water 2004 – 2005: The Biennial Report on Freshwater Resources. Peter Gleick. Island Press, 2004

Poverty alleviation as a business. Von Urs Heierli und Paul Polak. Swiss Agency of Development and Cooperation, 2000

Pillar of sand: Can the irrigation miracle last? Von Sandra Postel. W. W.Norton, 1999

Weblinks zu diesem Thema finden Sie bei www.spektrum.de unter »Inhaltsverzeichnis«.

Biologische Vielfalt: Schutz ist bezahlbar

Der Erhalt der Lebens- und Artenvielfalt ist keineswegs unerschwinglich – wenn man einige globale Grundregeln beachtet.

Von Stuart L. Pimm und Clinton Jenkins

Wie ein breites Band zieht sich die Viehweide tief in den Urwald. Wir stehen im warmen Regen wenige Fahrstunden östlich von Rio de Janeiro. Hier und jetzt ist unsere Generation aufgerufen, Entscheidungen für die Zukunft zu treffen. Es geht um nicht weniger als den Erhalt der Arten- und Lebensvielfalt unseres Planeten, um die Bewahrung der Biodiversität. Einst besaß Brasilien über eine Million Quadratkilometer Küstenwald. Nur zehn Prozent sind davon noch übrig. Nirgends sonst auf beiden amerikanischen Kontinenten leben so viele unmittelbar vom Aussterben bedrohte Tier- und Pflanzenarten wie in diesen dezimierten Waldgebieten.

Wir, das sind neben den beiden Autoren dieses Artikels unsere brasilianische Kollegin Maria Alice Alves, Ökologin an der State University von Rio de Janeiro, außerdem der Rancher, der das Waldstück von hundert mal tausend Metern für sein Vieh gerodet hat – im guten Glauben, dies sei die beste Weise, Geld zu verdienen, sowie ein Vertreter einer lokalen nichtstaatlichen Naturschutzgruppe, die sich für Wiederaufforstung einsetzt. Wir Forscher aus den USA mögen vielleicht internationale Unterstützung für das Anliegen einholen. Doch welches Gewicht das Land zukünftig der Viehwirtschaft einräumt und welches seinen Waldressourcen, entscheiden die drei Brasilianer, stellvertretend für Millionen ihrer Mitbürger.

An Orten wie diesen wird unsere Erde ärmer. Arten und Lebensformen, die verschwinden, sind für immer verloren – denn wir wohnen nicht in einem »Jurassic Park«. Wir können ausgestorbene Tiere nicht wieder aufwecken wie im Film. In der Wirklichkeit geht die biologische Vielfalt in vielen Gebieten der Welt, auch im Meer, ständig zurück. Vergeblich hielten wir im Hochland Hawaiis nach Vögeln mit eigenartigen Schnäbeln und so seltsamen Namen wie 'Akialoa, 'O'u oder Nukupu'u Ausschau. Seit Jahrzehnten hat sie niemand mehr gesehen. Der letzte Po'o uli ist wahrscheinlich gerade gestorben, als wir diesen Artikel schrieben.

Neue Zeitrechnung

So weit muss man aber gar nicht reisen, um die Veränderungen wahrzunehmen. Ein Besuch beim nächsten Fischhändler genügt. Sollten Sie je Atlantischen Sägebauch gespeist haben, lässt sich das leichter datieren als der Kauf eines Songs des Popstars Madonna. In den frühen 1980er Jahren setzte der organisierte Fang auf den Tiefseefisch ein, und binnen eines Jahrzehnts brach er wieder zusammen. Viele Fischbestände weltweit sind inzwischen erschöpft (siehe Spektrum der Wissenschaft 11/2004, S. 60).

Dass Arten erlöschen, ist ein natürlicher Vorgang, so könnte man einwenden. Richtig: Biospezies gehen meist irgendwann wieder unter. Gewissermaßen läuft ihre Zeit ab. Fossilien und Molekularstudien lassen das klar erkennen. Sorge bereitet allerdings die heutige Rasanz. Im Schnitt existieren Arten vielleicht eine Million Jahre lang – nimmt man die fünf großen Massensterben der Erdgeschichte aus der Statistik heraus. Demnach würde pro Jahr eine von einer Million Arten aussterben. Zum Beispiel kennen wir etwa 10000 Vogelspezies. Von denen dürfte dann alle hundert Jahre eine verschwinden. Tatsächlich trifft es aber eine Vogelart im Jahr.

Genauso unnatürlich ist das rasante Aussterbetempo von anderen Tieren und von Pflanzen. Und schuld daran ist letztlich der Mensch – oder genauer gesagt Aktivitäten wie die Jagd, das Einschleppen fremder, sich aggressiv ausbreitender Organismen, besonders aber die Vernichtung von Lebensraum. Überdies droht jetzt eine globale Erwärmung. Der Klimawandel bedeutet für die Artenvielfalt eine womöglich ebenso große – und zusätzliche – Gefahr wie der Verlust ganzer Lebensräume.

Will man dieses Sterben eindämmen, muss man wissen, dass bestimmte Arten schon per se viel stärker gefährdet sind als andere. Hinzu kommt, dass sich solche besonders verletzlichen Spezies mancherorts stark häufen. Beeinträchtigt der Mensch ausgerechnet diese Gegenden durch seine Aktivitäten, drohen hohe Aussterberaten. Leider kollidieren gerade in solchen Gebieten die menschlichen Interessen allzu oft mit denen der Natur. Dieser Zusammenhang hat uns zu der Viehweide mitten im brasilianischen Küstenwald geführt, und deswegen kümmern uns die Nebelwälder auf Hawaii mehr als – sagen wir – ein Kornfeld in Iowa mitten in den USA. Um die Mannigfaltigkeit des Lebens zu erhalten, ist es erforderlich, sich besonders mit jenen speziellen Gegenden zu befassen, in denen sich gefährdete Arten konzentrieren. In mancher Hinsicht erleichtert das die Aufgabe sogar. Andererseits bauen sich aber gerade deshalb hohe Hürden auf. Nicht zuletzt steht unserem Ziel im Weg, dass die betreffenden artenreichen Regionen meist in den Tropen und dazu in Entwicklungsländern liegen.

Bei all dem dürfen wir nicht vergessen, dass die reichen Industrienationen, als sie sich entwickelten, ihre natürlichen Ressourcen durchaus nicht geschont haben. Steht uns Wohlhabenden überhaupt ein Recht zu, den armen Ländern Fortschritt auf dieser Basis zu untersagen? Mancher mag die Ansicht vertreten, der Artenverlust habe den entwickelten Regionen nicht geschadet und vielleicht gehe es den Menschen hier infolgedessen umso

besser. Das ist aber ein Irrtum! Bei genauerem Hinsehen brachte den reichen Ländern die Vernichtung ihrer Ressourcen allzu oft nichts ein. Sie machen sich vielfach nicht klar, wie viele Steuergelder in Subventionen für Aktivitäten fließen, die ökologische Strukturen zerstören. So verlieren wir Natur und Geld zugleich.

Brennpunkte

Auch die Armen der Welt werden vom Raubbau an ihrer Umwelt nicht in jedem Fall profitieren, im Gegenteil. Beispielsweise decken viele dieser Länder einen Großteil des Proteinbedarfs mit Fisch. Würden nun die eigenen Fanggründe nicht mehr genug hergeben, hätten diese Menschen weder Möglichkeiten noch Mittel, sich Fisch einfach in irgendwelchen anderen fernen Weltregionen zu besorgen. Genauso sind die Bewohner armer Länder meist darauf angewiesen, dass ihnen der eigene Wald kostenlos Brennholz, Nahrung und Süßwasser liefert.

Um möglichst viel von der Biodiversität unserer Welt zu erhalten, müssen wir die gefährdeten artenreichen Gebiete zuerst einmal bestimmen, damit wir sie dann möglichst unverzüglich unter Schutz stellen können. Zwei häufig geäußerten Einwänden lässt sich aber entgegnen: Der Erhalt der biologischen Vielfalt verträgt sich durchaus mit der Notwendigkeit, dass alle Menschen genug zu essen haben. Es ist auch nicht etwa so, dass wir dem industriell geprägten Lebensstil abschwören und wieder fast in die Steinzeit zurückkehren müssten. Sicher – die biologische Vielfalt zu erhalten kostet einiges. Hoch ist aber auch der Nutzen, den wir davon haben.

Man darf sich nicht täuschen: Nicht zwangsläufig ereignet sich Artensterben umso mehr dort, wo mehr Menschen leben oder wo die reichere Biovielfalt herrscht. Ein solcher Schlüssel wäre zu einfach. Global gesehen drohen im dicht besiedelten Europa und im Osten Nordamerikas zahlenmäßig eher wenig Verluste, obwohl der Mensch dort die Natur dominiert. In diesen gemäßigten Breiten ist die Artenzahl vergleichsweise klein. Umgekehrt ist die Aussterberate aber ▷



Ein Großteil des Organismenreichtums dieser Erde ließe sich erhalten, würden wir 25 »Hotspots« vor der Zerstörung retten. Zu diesen Gebieten gehört der Küstenregenwald Brasiliens, von dessen Vegetation das Foto einen Eindruck gibt.

MINDEN PICTURES / TUI DE ROY

▷ auch im Amazonasbecken mit seinem außerordentlichen Artenreichtum im Vergleich zu manchen anderen Orten eher gering. Dagegen sind unter anderem fast alle Tier- und Pflanzenarten bedroht – und teilweise schon verschwunden –, die allein auf Inseln leben, generell auch die Säugetiere Australiens, die Pflanzen der Kapregion im Süden Afrikas, wie auch etwa die Fische des Mississippi-Beckens und der ostafrikanischen Seen.

Um zu verstehen, wieso speziell an Orten wie diesen besonders viele Arten eingehen, muss man die vier biogeografischen Gesetzmäßigkeiten heranziehen, die im Kasten rechts aufgelistet sind. Zusammengenommen besagen sie: Aufs Ganze gesehen hat die Natur insbesondere leicht verletzliche, leicht ausrottbare Arten hervorgebracht; diese hat sie zudem an wenigen Stellen versammelt; und ausgerechnet diese Stellen stecken jetzt voller Gefahr. Bildlich könnte man sagen: Es gibt unter den Arten auffallend viele rohe Eier; die werden in nur wenigen Körben aufgehoben; und die Körbe stehen mitten auf stark befahrenen Kreuzungen. Nun zu den vier Gesetzen:

Erstens: Es gibt insgesamt gesehen außerordentlich viele Organismen mit einem recht kleinen, nur lokalen Verbreitungsgebiet, dagegen auffallend wenige mit weiter Ausbreitung. Die Lebensräume der Arten sortieren sich also nicht etwa wie bei einer statistischen Normalverteilung um einen Wert etwa in der Mitte, sondern eine kleinräumige Verbreitung herrscht bei Weitem vor. Wenn man einen Wald abholzt, ein Feuchtgebiet trockenlegt, einen Fluss eindämmt oder an einem Korallenriff mit Dynamit fischt, sind Arten mit geringer Ausdehnung zwangsläufig verletzlicher als Arten mit großem Lebensgebiet. Für sie besteht eine viel größere Ausrottungsgefahr.

Zweitens: Arten mit kleiner Verbreitung machen sich in ihrem Lebensraum gewöhnlich ausgesprochen rar, das heißt solche Tiere oder Pflanzen treten meist in geringer Dichte auf. Das erhöht die Bedrängnis, wenn wir ihre Habitate angreifen.

Drittens: Die Tropenwälder beherbergen beträchtlich mehr verschiedene Arten als andere Zonen auf dem Land, wie etwa die gemäßigten oder kalten Breiten. Zwangsläufig verschwinden unzählige der verletzlichen, kleinräumig vorkommenden Lebewesen, wo immer die tropischen Urwälder schrumpfen – und das geschieht heute rasend schnell.

Viertens: Auffallend viele von den Arten mit kleinem Verbreitungsgebiet sind in lediglich einigen ausgesuchten Gegenden der Tropen heimisch. Zerstört man diese herausragenden Regenwaldgebiete, vernichtet man besonders viele Spezies.

Alles zusammengenommen können die vier Gesetze erklären, was wir auch beobachten: Artensterben findet in hohem Maße statt, wenn Habitate mit vielen verletzlichen Arten vernichtet werden, also insbesondere bei der Zerstörung von Tropenwald.

Die Finanzierung

Wie stark sich die Artenbedrohung auf einzelne Regionen zuspitzt, zeigt das Konzept der »Hotspots« (heißen Flecken). Schätzungsweise die Hälfte aller heutigen landbewohnenden Tier- und Pflanzenarten lebt in den Tropen in vielleicht 25 früher meist bewaldeten Gebieten, wo aber der Mensch die natürliche Vegetation schon zu über 70 Prozent – oft wesentlich mehr – vernichtet hat. Der Umweltforscher Norman Myers von der Duke University in Durham (North Carolina) definiert als »Hotspots« Gegenden mit mindestens diesem Zerstörungsgrad der ursprünglichen Pflanzenwelt, in denen verletzliche Arten im oben beschriebenen Sinne in hoher Zahl vorkommen. Als Untergrenze setzte er 1500 nur dort verbreitete Pflanzenspezies an.

Über die Lebensvielfalt in den Ozeanen wissen die Forscher leider viel weniger. Anzunehmen ist aber, dass auch dort der weitaus größte Teil der Arten ein kleines Verbreitungsgebiet hat und sich auf wenige Gebiete konzentriert. Besonders artenreich dürften die Korallenriffe sein. Bekanntlich wütet auch dort der Mensch.

Doch zurück zu den Wäldern: Noch sind ausgedehnte Flächen intakten Urwalds erhalten, sowohl tropische Regenwälder etwa im Amazonasgebiet oder im Kongobecken, als auch trockenere Waldgebiete in Afrika, und ebenfalls Nadelwälder in Kanada und Russland. Setzt der Mensch deren Zerstörung aber auf heutigem Niveau fort, wird dies zusammen mit dem Rückgang der Vielfalt in den »Hotspots« bald schon einen Artenuntergang herbeiführen, dessen Rate die natürliche Aussterbegeschwindigkeit um das Tausendfache übertrifft.

Doch wie geht man am besten vor, wenn man erkannt hat, welche Gebiete und Regionen besondere Bemühungen

ERHALT DER BIOLOGISCHEN VIELFALT

Das Problem

▶ Die heutige Aussterberate von Tier- und Pflanzenarten – biologischen Spezies – übertrifft den an Fossilien und molekularen Merkmalen ermittelten »normalen« Wert bald um das Tausendfache. Das macht die Erde unwiderruflich ärmer.

Der Plan

▶ Wir müssen sofort handeln, möchten wir die noch vorhandene Biodiversität erhalten.

▶ Am wirksamsten wäre es, speziell deklarierte Gegenden zu schützen, wo besonders viele bedrohte Arten leben. Das sind die noch übrigen Urwaldgebiete und dazu 25 »Hotspots«, schon hochgradig zerstörte Regionen mit besonders vielen bedrohten Arten.



MINDEN PICTURES, MITSUAKI IWAGO

Die Fotos dieses Artikels zeigen seltene Arten aus »Hotspot«-Regionen, hier Schlanklori (*Loris tardigradus*), Sri Lanka.

Gesetze der Biogeografie

Es gibt ökologische Regeln, die in allen Weltregionen gelten und auch auf verschiedene Organismengruppen zutreffen. Vier Gesetzmäßigkeiten beschreiben die Verteilung von biologischen Arten.

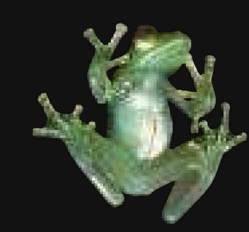
Gesetz 1:
Nur wenige Arten sind weit verbreitet. Die weitaus meisten Tier- und Pflanzenspezies leben in einem sehr kleinen geografischen Gebiet.

Gesetz 2:
Arten mit kleinem Verbreitungsgebiet sind in der Regel »seltene Arten«: Sie sind vor Ort selten zu finden, denn die Individuen leben meist auch noch verstreut und sind in geringer Zahl vorhanden. Dagegen gehören viele Arten mit weiter Verbreitung zu den »häufigen Arten«: Deren Angehörige treten oft und vielerorts in Erscheinung.

Gesetz 3:
Wie viele Arten in einem Gebiet bestimmter Größe vorkommen, variiert beträchtlich, abhängig unter anderem von der geografischen Lage. Generell weisen etwa hohe Breiten wenig Arten auf, die Tropen viele.

Gesetz 4:
Arten mit geringer Verbreitung häufen sich in bestimmten Gebieten.

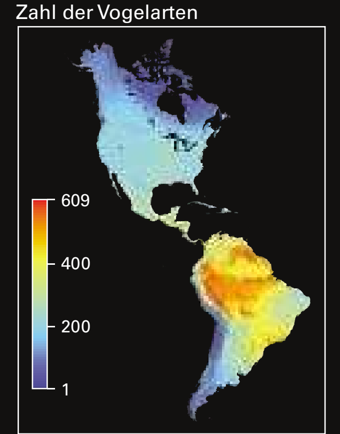
Beispiel für Gesetz 3:
Im Amazonasgebiet leben gut hundertmal mehr Vogel- und Amphibienarten als in der kanadischen Tundra.



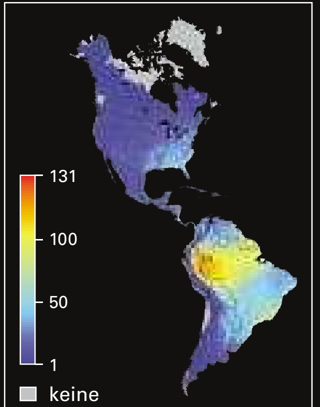
Glasfrosch *(Centrolenella sp.)*, Mittel- und Südamerika

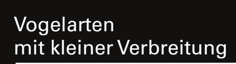
Beispiel für Gesetz 4:
Amazonien beheimatet kaum kleinräumig verbreitete Wirbeltiere. Dagegen drängen sich am Fuß der Anden und in den Küstenwäldern Brasiliens ausgesprochen viele Arten mit kleinem Verbreitungsgebiet.

Zahl der Vogelarten

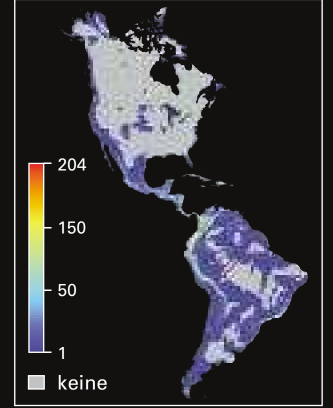


Zahl der Amphibienarten

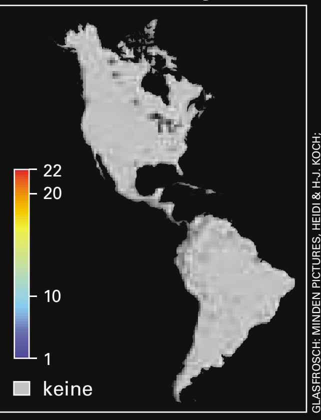




Vogelarten mit kleiner Verbreitung



Amphibienarten mit kleiner Verbreitung



um Artenschutz verdienen? Nicht zuletzt ist das eine Frage der Finanzierung. Dass das Geld von den entwickelten Ländern kommen muss, liegt auf der Hand. Aber gerade das macht die Sache kompliziert. Denn die meisten dieser Urwälder und »Hotspots« gehörten zu ehemaligen Kolonien europäischer Staaten; das östlich von Australien gelegene Neukaledonien ist noch heute französisches Territorium. Man kann sich vorstellen, dass die ehemaligen Kolonialländer nicht gerade begeistert sind, wenn ihre einstigen Kolonialherren nun die Wälder retten möchten. Verständlicherweise sehen die jungen Staaten ihren Waldbestand eher als Einkommensquelle denn als zukünftige Nationalparks.

Sicher verdienen diese Länder daran, wenn sie Konzessionen für Holzeinschlag verkaufen. Aber besonders viel bringt ihnen das nicht ein. Demgegenüber kann ihnen aus großflächigen Rodungen ein durchaus beachtlicher Schaden erwachsen, und das nicht nur für die Natur, sondern auch für die Bevölkerung eines Landes. Wie viel Geld müssten Naturschutzverbände aufbringen, wollten sie diese Gebiete aufkaufen? Der Preis für die noch erhaltenen ursprünglichen Regenwälder – insgesamt ungefähr fünf Millionen Quadratkilometer – würde sich aktuell auf fünf Milliarden Dollar belaufen. Dieser Betrag scheint aufwendbar, angesichts der Summen, die aus privater Hand in internationale Naturschutzorganisationen fließen.

Allerdings ist die Finanzierung bei solchen Schutzbemühungen längst nicht das einzige Problem. Nicht zuletzt müssen wir darauf vorbereitet sein, dass wegen immer mehr unter Schutz gestellter Flächen der Waldwert aus Sicht der Holzwirtschaft steigen könnte – und damit die Gefahr unerlaubter Zugriffe. Bedenkt man den Umfang heutigen illegalen Einschlags, ist zu fragen, wie denn garantiert werden kann, dass Reservate auch in Zukunft als solche bestehen bleiben. Nehmen wir Indonesien: Dieses Land besitzt die weltweit zweitgrößten geschützten Waldgebiete. In der internationalen Einschätzung gehört es jedoch zu den korruptesten Staaten der Welt. Es steht auch in dem Ruf, sich über die Rechte seiner indigenen Bevölkerung hinwegzusetzen, die im und vom Wald lebt.

Die meisten Bäume in den Tropen roden jedoch bitterarme Menschen. Sie suchen eine neue Existenz und benötigen ein wenig karges Acker- und Weideland, denn oft wurden sie von ihrem eigenen Grund und Boden vertrieben. Manchmal ▷

Besonders schützenswerte Gebiete hohen Artenreichtums

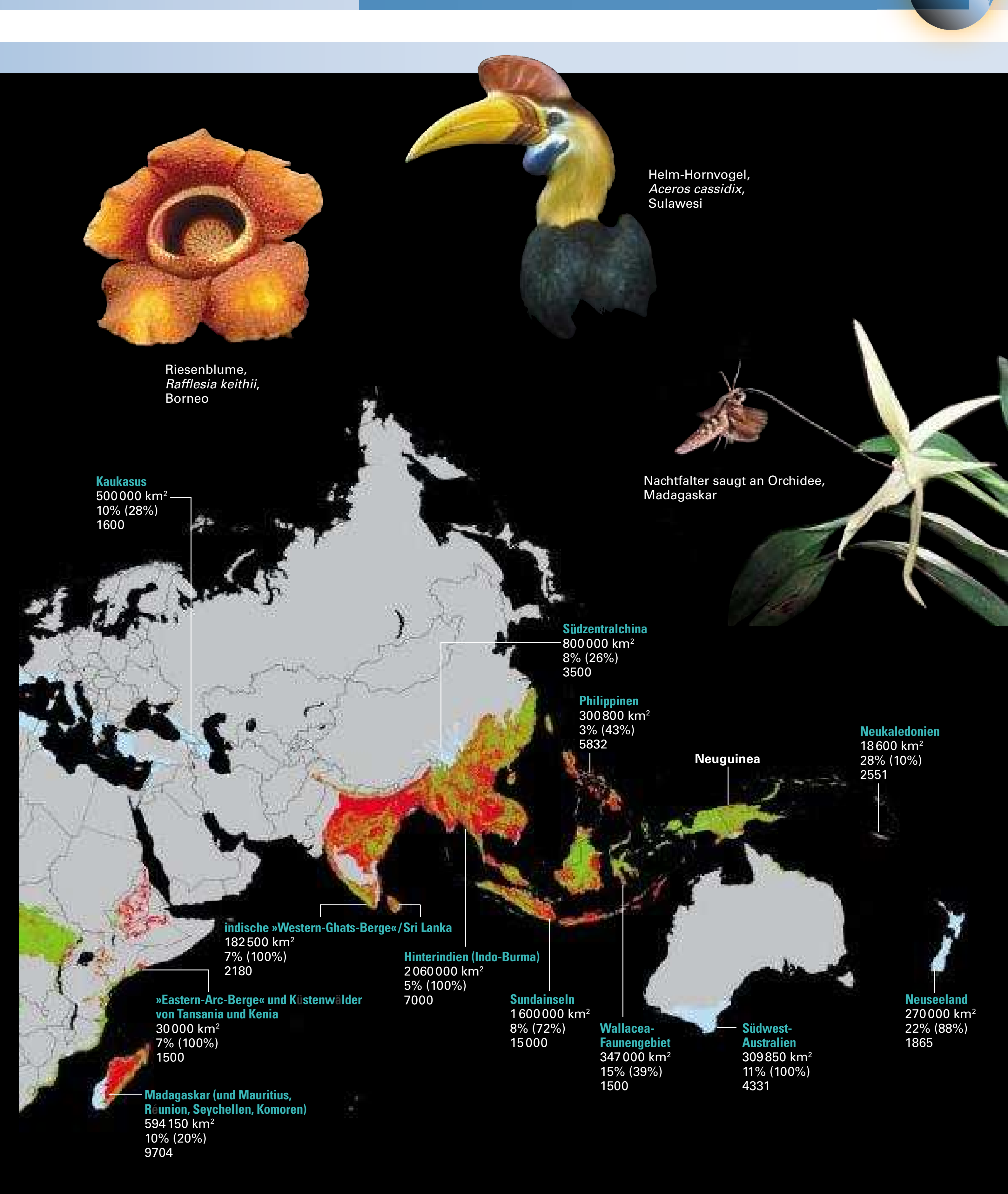
Möglichst viele Arten möglichst kostengünstig zu retten, kann gelingen, wenn wir die drei noch vorhandenen ursprünglichen großen tropischen Regenwaldgebiete (weiß beschriftet) und zusätzlich 25 »Hotspots« (grüne Schrift) unter Schutz stellen. Diese Gegenden beherbergen zusammen den größten Teil der Tier- und Pflanzenarten der Erde. Norman Myers von der Duke University in Durham (North Carolina) definiert »Hotspots« als artenreiche Gebiete mit einer großen Zahl nur dort heimischer Pflanzen und mindestens 70 Prozent Verlust der ursprünglichen Vegetation.

Kussmäulchen
Nematanthus corticola,
Brasilien

Mähnenwolf,
Chrysocyon brachyurus, Südamerika

Panther-Chamäleon,
Furcifer pardalis,
Madagaskar

DATEN ZU TROPISCHEN WALDGEBIETEN AUS: ANNALS OF THE MISSOURI BOTANICAL GARDEN 2002, BD. 89, N. 2, S. 99-125, D. M. OLSON & E. DINERSTEIN, GLOBAL 200, PRIORITY ECOREGIONS FOR GLOBAL CONSERVATION; DATEN ZUR WALDBEDECKUNG AUS: GLOBAL LAND COVER MAP 2000, GLC2000 DATABASE, FORSCHUNGSZENTRUM DER EUROPÄISCHEN KOMMISSION 2002; – HOTSPOT-DATEN: DUKE UNIVERSITY, NORMAN MYERS; FOTOS: NEW YORK BOTANICAL GARDEN, W. WAYT THOMAS (KUSSMÄULCHEN); MINDEN PICTURES, FRANS LANTING (CHAMÄLEON, MÄHNENWOLF, RIESENBLUME); MINDEN PICTURES, MARK JONES (HORNVOGEL); MINDEN PICTURES, MITSUHIKO IMAMORI (NACHTFALTER)


Helm-Hornvogel,
Aceros cassidix,
Sulawesi
Riesenblume,
Rafflesia keithii,
Borneo
Nachtfalter saugt an Orchidee,
Madagaskar
Kaukasus
500 000 km²
10% (28%)
1600
Südzentralchina
800 000 km²
8% (26%)
3500
Philippinen
300 800 km²
3% (43%)
5832
Neuguinea
Neukaledonien
18 600 km²
28% (10%)
2551
indische »Western-Ghats-Berge«/Sri Lanka
182 500 km²
7% (100%)
2180
Hinterindien (Indo-Burma)
2 060 000 km²
5% (100%)
7000
»Eastern-Arc-Berge« und Küstenwälder von Tansania und Kenia
30 000 km²
7% (100%)
1500
Sundainseln
1 600 000 km²
8% (72%)
15 000
Wallacea-Faunengebiet
347 000 km²
15% (39%)
1500
Südwest-Australien
309 850 km²
11% (100%)
4331
Neuseeland
270 000 km²
22% (88%)
1865
Madagaskar (und Mauritius, Réunion, Seychellen, Komoren)
594 150 km²
10% (20%)
9704

kommen sie aus städtischen Slums, und die Regierung hat sie zu dem Neuanfang als Ausweg aus der Armut in den Städten ermuntert. Von diesen Menschen dürfen wir nicht einfach fordern, den Wald stehen zu lassen. Ohnehin könnten sie sich nicht daran halten, aber wir hätten dazu auch kein Recht. Wir können aber etwas anderes tun: Wenn diese Wälder uns Reichen so wichtig sind, müssen wir diesen Ländern Gegenwerte anbieten – dafür, dass sie auf die karge Viehweide verzichten und den Regenwald tatsächlich bewahren helfen. Natürlich muss sichergestellt sein, dass die Zuwendungen bei denen ankommen, die nahe am Wald leben. Sie sind diejenigen, die täglich über seine Zukunft entscheiden. Nicht nur Politik, auch Naturschutz geschieht letztlich vor Ort.

Die stark zersiedelten »Hotspots« mit ihren Restwaldflecken verlangen andere Maßnahmen als die dünn bewohnten, ausgedehnten Urwälder. Schon allein die Bodenpreise sind wesentlich höher. Macht es überhaupt Sinn, diese zerstückelte Wildnis unter Schutz zu stellen? Nach Meinung von Experten unbedingt, doch muss man umsichtig vorgehen.

Worauf es dabei ankommt, lernt man am Küstenregenwald Brasiliens (siehe Kasten unten). Gemeinsam mit unserer brasilianischen Kollegin Maria Alves und ihren Mitarbeitern haben wir zusammengetragen, was zu diesem Gebiet über die Artenverbreitung und -bedrohung bekannt ist, und geschaut, inwieweit sich diese Informationen mit Höhenaufnahmen von der Vegetation decken.

Waldstücke vernetzen

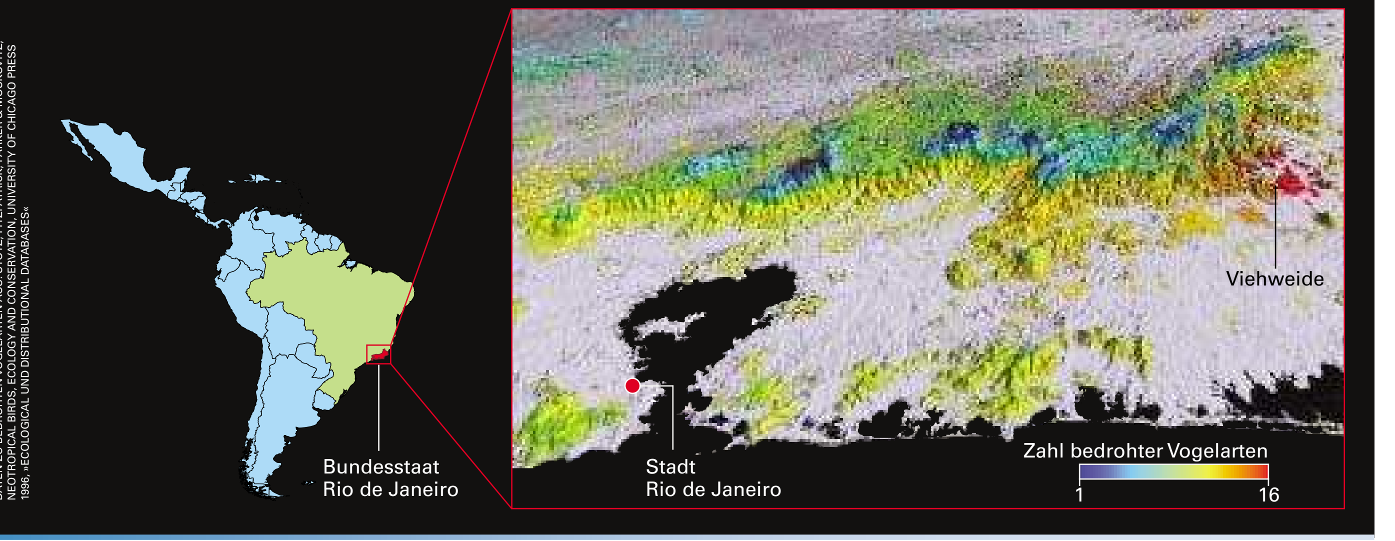
Wie sich zeigte, blieben in den hohen Lagen große zusammenhängende Waldgebiete erhalten. Das mag nicht verwundern, denn diese stellenweise bis über 2000 Meter hohen Bergregionen sind schwer zugänglich. So sind denn auch wenige der nur dort heimischen Arten gefährdet. Das ändert sich, wenn man weiter hinabsteigt. Am meisten Sorgen bereitet der zerstückelte Regenwald im Flachland. In diesen letzten Waldflecken leben die meisten verletzlichen Spezies dieses Gebiets. Viele der bereits bedrohten Pflanzen und Tiere in kleinen, unverbundenen Waldflecken werden erfahrungsgemäß nicht mehr lange durchhalten, wenn ihre auch zahlenmäßig schwachen Populationen nicht gelegentlich eine Auffrischung durch Zuwanderung erhalten. Wo keine Waldbrücken existieren, könnten diese Organismen zudem nicht in die kühleren Höhen ausweichen, falls das Klima wärmer wird.

Unser Plan ist, in Brasiliens Küstenregion noch möglichst viel von der ursprünglichen Biodiversität zu bewahren, indem man die zerstückelten Waldgebiete wieder vernetzt. Das kann relativ kostengünstig geschehen, indem kleinere Lücken wie die eingangs beschriebene Viehweide wieder geschlossen werden. Damit das Projekt auch Erfolg hat, arbeiten wir eng mit dortigen Wissenschaftlern und Naturschutzverbänden zusammen. Solche Kontakte sind entscheidend, denn in Ländern mit hoher Biodiversität mangelt es meist an Fachkräften, die es verstehen, solche Vorhaben an die speziellen ökonomischen und politischen, religiösen und kulturellen Zwänge vor Ort anzupassen. Um den Menschen Schutzmaßnahmen näher zu bringen und die unvermeidlichen Kontroversen über die Nutzung der eigenen Ressourcen beizulegen, braucht man gut geschulte, ideenreiche Mitarbeiter, die bestens mit den lokalen Gepflogenheiten vertraut sind.

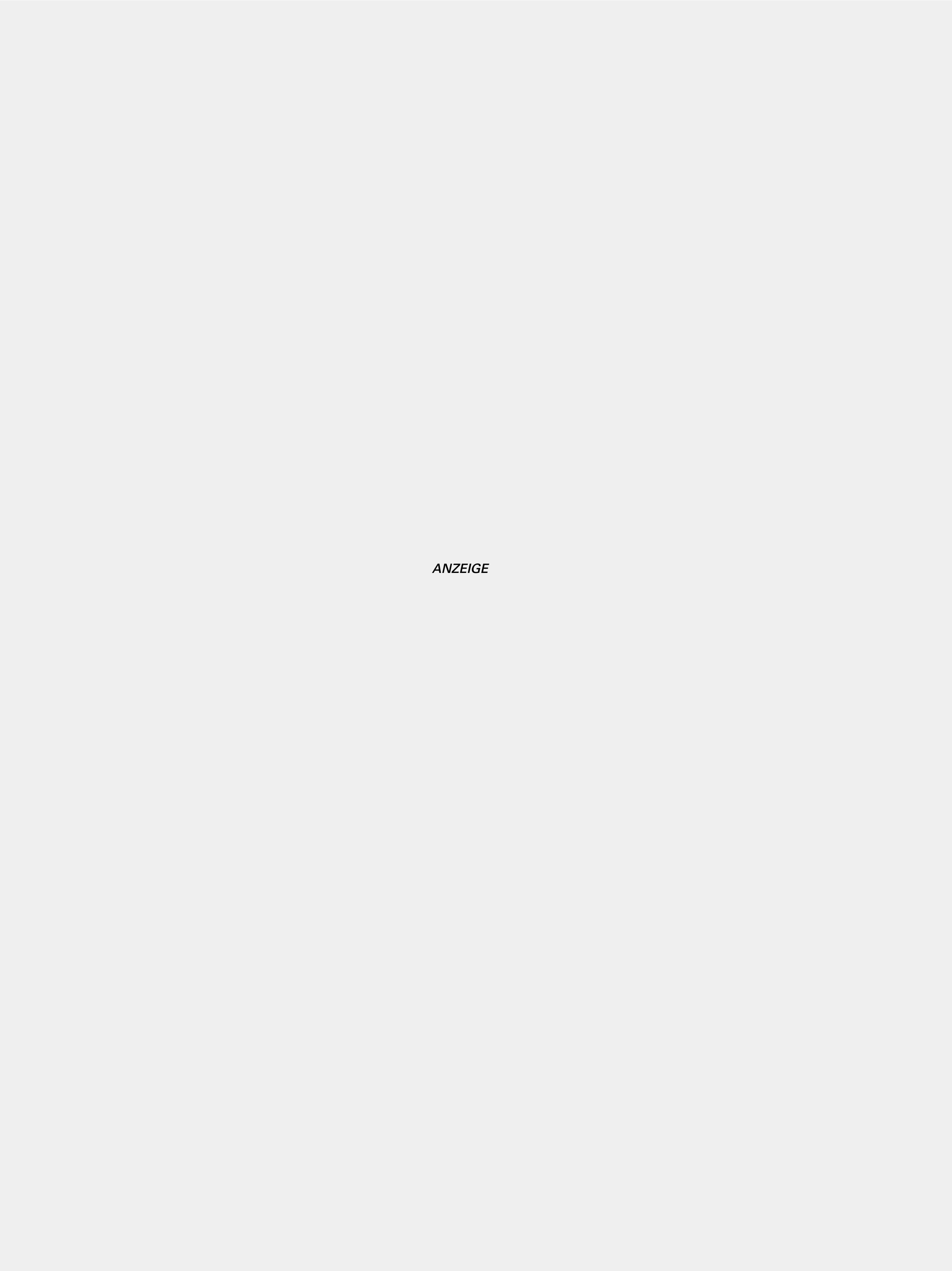
Über manche Entwicklungsprojekte entbrennen auch übernational heftige Streits. Brasilien etwa will mit dem ehrgeizigen Großvorhaben »Avança Brasil« das Amazonashinterland wirtschaftlich unter anderem durch den Ausbau von Straßen und Wasserwegen erschließen.

Effektive Maßnahmen in »Hotspots«

Zu den Gebieten mit den meisten bedrohten Arten weltweit gehört der brasilianische Bundesstaat Rio de Janeiro (im Bild unten rot markiert; rechts ein Höhenrelief; Wald farbig; entwaldete Gebiete grau). Im dortigen, heute arg zerstückelten Flachland-Regenwald liegt die Viehweide, die die Autoren eingangs erwähnen (im Bild rechts ist die Gegend rot eingezeichnet). Vorrangig wollen Naturschützer nun die letzten tiefer gelegenen Waldflecken wieder mit dem höher gelegenen Urwald vernetzen, denn fast alle einheimischen bedrohten Vögel leben in solchen abgeschnittenen Arealen.



DATEN ZU BEDROHTEN VOGELARTEN AUS: STOTZ, FITZPATRICK, PARKER & MOSKOVITZ, NEOTROPICAL BIRDS, ECOLOGY AND CONSERVATION, UNIVERSITY OF CHICAGO PRESS 1996, »ECOLOGICAL UND DISTRIBUTIONAL DATABASES«


ANZEIGE

▷ Obwohl es dabei ausdrücklich umweltschonend vorzugehen plant, sehen viele die Gefahr, dass weite Urwaldflächen in wenigen Jahrzehnten verschwinden oder ökologisch beträchtlich verarmen werden.

Warum gesteht man einem Land wie Brasilien nicht zu, was beispielsweise die Vereinigten Staaten längst getan haben: Zur Gewinnung von Nutzland Wälder abzuholzen? Zwei Überlegungen seien dagegen angeführt. Erstens stehen die meisten tropischen Regenwälder auf äußerst armen Böden, ganz anders als viele Wälder in gemäßigten Breiten. Etwa die Hälfte allen Tropenwalds der Erde ist bereits abgeholzt, das ergibt rund sieben Millionen Quadratkilometer. Davon dienen aber nur zwei Millionen als Ackerland. Nicht nur wegen des schlecht geeigneten Bodens, sondern auch wegen falscher Behandlung liegt der Rest – so viel wie die halbe Fläche Europas – weit gehend brach. Höchstens wächst darauf karges Unkraut, das teilweise nicht einmal die wenigen Ziegen oder Rinder fressen mögen, die hier ihr Futter finden sollen. Wer heute immer noch glaubt, Waldrodung würde unbedingt die Wirtschaft ankurbeln, sollte einmal diese verödeten Landstriche aufsuchen.

Unrentable Eingriffe in die Natur

Zweitens ist es falsch zu meinen, für die entwickelten Länder hätte es sich ausgezahlt, natürliche Ressourcen zu vernichten. Ein hervorragendes Gegenbeispiel stellen die USA dar. Die meisten größeren Flüsse in den Vereinigten Staaten wurden eingedämmt und begradigt. Wie viel Steuergelder für dergleichen Zwecke letztlich unsinnig verpuffen, machen sich die wenigsten klar.

Nehmen wir nur die Everglades im Süden Floridas. Das ökologisch und wasserwirtschaftlich wertvolle Sumpfland wurde im 20. Jahrhundert zu großen Teilen mittels Dämmen und Kanälen trockengelegt, vor allem für Zuckerrohrfelder. Den landeseigenen Anbau subventionieren die USA, indem der Verbraucher im Jahr fast eine Milliarde Dollar mehr für Zucker bezahlt, als das Produkt auf dem Weltmarkt kosten würde. Hinzu kommen die Aufwendungen für die Schutzwälle und Entwässerungsgräben und deren Erhalt sowie für Sanierungsmaßnahmen, die wegen der massiven Umweltschäden durch diese Industrie erforderlich sind und dergleichen mehr. Überdies werden derzeit beinahe zehn Milliarden Dollar ausgegeben, um den Wasserhaushalt Südfloridas zu renaturieren. Bis das der Natur wirklich zugute kommt, dürfte allerdings ein Vierteljahrhundert verstreichen.

Besonders viele krasse Beispiele für unrentable Subventionen liefert der Fischfang. Die Weltausbeute an Fischen bringt längst nicht so viel wieder ein wie das Fangen kostet. Norman Myers und Jennifer Kent nennen in ihrem Buch »Perverse Subsidies« (Widersinnige Subventionen) 70 Milliarden Dollar als geschätzten Marktwert des gesamten im Jahr 1989 gefangenen Fischs. Dem gegenüber stehen Fangkosten von 124 Milliarden Dollar, Extrazuwendungen noch nicht einmal mitgerechnet.

Was die Natur alles an Eigenleistung bietet, wird meist völlig unterbewertet. Im vierten, im Mai 2005 erschienenen »Millenium Ecosystem Assessment« (der größten internationalen Studie über die Vernetzung der globalen Ökosysteme als Lebensgrundlage für den Menschen) werden unter anderem folgende Leistungen aus einer langen Liste angeführt: Nahrung, Süßwasser, Brennholz, Arzneipflanzen, Wildformen von Nutzpflanzen, Hochwasserschutz und Klimaregulation. Und genauso wertvoll wie der Erholungswert der Natur ist ihre Schönheit für uns Menschen. Das alles sollte ein Land in die Waagschale werfen, bevor es den Wald abholzt.

Die reichen Länder müssten sich bemühen, Entwicklungsländern die Entscheidung zu erleichtern. Zum Beispiel sollte man sie in den jetzt zwischen Industriestaaten aufblühenden Handel mit Lizenzen für Kohlendioxid-Emissionen gemäß dem Kioto-Protokoll einbeziehen. Die Idee hinter dem internationalen Handel mit Treibhausgasen ist, dass Wälder Klimasenken darstellen. Industrienationen sollen sich gegebenenfalls bei waldreichen Nationen Emissionsrechte erkaufen. Laut dem Zwischenstaatlichen Ausschuss für Klimafragen (IPCC) entsteht ein Viertel der globalen Kohlendioxid-Emissionen bei Umwandlungen der Landnutzung, was vor allem Waldrodung bedeutet.

Ein auf die Entwicklungsländer ausgedehnter Kohlendioxidmarkt könnte Anreize setzen, dass die waldreichen Nationen der Tropen ihre Wälder stehen lassen, statt sie in Viehweiden umzuwandeln. Der Ökotourismus ist ein weiterer solcher Anreiz. Ob Tropenwälder, Korallenriffe oder Feuchtgebiete – eigentlich alle Gegenden mit bedrohten Arten faszinieren den Menschen genau deswegen. Oft liegen diese Orte, zu denen es Naturfreunde zieht, zu abgeschieden, um in die Wirtschaft des Landes eingebunden zu sein. Staatliche Zuwendungen finden schon gar nicht den Weg dorthin. Zum Beispiel arbeitet unser Team in einem abgelegenen Dorf im Nordwesten Madagaskars, wo das Durchschnittseinkommen weniger als einen Dollar am Tag beträgt. Nach internationalem Maßstab sind dort der Eintritt für den nahen Nationalpark, die Zeltplatzgebühren und die Restaurantpreise billig. Aber die Dorfbewohner schätzen diese Einnahmen so hoch, dass sie sich davor hüten, ihren Wald mitsamt den Lemuren niederzubrennen.

Der Schutz der biologischen Vielfalt ist erschwinglich – ob es nun um riesige, einsame Waldlandschaften geht oder um die »Hotspots« im Meer und auf dem Land. Viele der dazu notwendigen Maßnahmen sind nicht einmal teuer. Viele verhelfen den Menschen vor Ort zu einem Einkommen. Unsere Generation entscheidet, ob wir diesen Weg wählen. Für die nächste Generation wäre es dazu vielleicht schon zu spät. ◁

AUTOREN UND LITERATURHINWEISE





Stuart L. Pimm und **Clinton Jenkins** sind Ökologen für Natur- und Artenschutz an der Duke University in Durham (North Carolina), wo sie an der Nicholas School of the Environment and Earth Sciences arbeiten. Sie untersuchen frühere und mögliche künftige Artensterben. Jenkins hat sich dabei auf geografische Informationssysteme und Fernerkundung spezialisiert.

Hat die Vielfalt des Lebens auf der Erde eine Zukunft? Von Stuart L. Pimm in: Natur und Kultur, Bd. 3, 2002, Heft 2, S. 3

Ecosystems and human well-being: Synthesis report (Millenium Ecosystem Assessment). Island Press, 2005

The world according to Pimm: A scientist audits the earth. Von Stuart L. Pimm. McGraw-Hill, 2001

Weblinks zu diesem Thema finden Sie bei www.spektrum.de unter »Inhaltsverzeichnis«.

ZYLINDERSCHLOSS

HighMech gegen Einbrecher

Moderne Schließanlagen sind Kunstwerke der Feinmechanik, doch auch sie bieten keine absolute Sicherheit.

Von Alexander Glück

Sperrtechnik, so bezeichnet der Fachjargon nüchtern einen Wettstreit: Mit einem Mix aus moderner Materialtechnik, Physik und Mathematik machen Hersteller von Sicherheitssystemen wie dem Zylinderschloss Dieben und Einbrechern das Leben schwer. Auch wenn jede Verriegelung letztlich zu knacken ist, soll der erforderliche Aufwand Kriminelle abschrecken.

Das Grundprinzip mechanischer Schlösser ist einfach und war schon in der Antike bekannt. Ein Federmechanismus drückt einen Riegel fest in eine Eintiefung im Türrahmen, ein Schlüssel vermag diesen Riegel zurückzuschieben. Damit einem Dieb nicht ein einfacher Haken als Dietrich genügt, blockieren Sperrstifte den Riegel. Über das Profil des Schlüsselbarts werden sie angehoben und geben so den Weg frei. Auch dieses Prinzip war bereits den Römern bekannt.

Derart einfache Systeme eignen sich heute allenfalls für den Wohnzimmerschrank oder das Gartenhäuschen. Vom Fahrradschloss bis zur Firmenschließanlage ist das Zylinderschloss der Sicherheitsstandard. Der Schlüssel bewegt eine Walze in einem Röhrchen und dreht dabei auch eine metallene Nase, die in einer Nut dieser Röhre verläuft. Die wiederum greift in einen Mechanismus ein, der letztlich den oder die Türriegel zurückzieht. Durch die Metallhülse greifen auch bis zu zwanzig Sicherungsstifte, die eine Drehung des Zylinders verhindern. Sie bestehen aus dem eigentlichen Stift und einem mit einer Feder versehenen Bolzen. Wird nun der passende Schlüssel eingeführt, hebt oder drückt sein Profil diese Elemente so, dass alle Stifte auf einer Linie liegen und in der Walze verschwinden – sie lässt sich nun drehen.

Spitzenprodukte wie die des deutschen Herstellers Winkhaus haben nicht nur senkrecht, sondern auch quer angreifende Sicherungen, die über Eintiefungen in den Seitenflächen des Schlüssels bewegt werden. Sogar magnetische Systeme sind auf dem Markt: Winzige Magnete im Schlüssel ziehen Riegel an oder stoßen sie ab.

Ein einfacher Bart verfügt bereits über fünf Positionen für die Kerben, jede davon kann etwa acht mögliche Tiefen haben. Das ergibt bereits 32768 mögliche Profile. Der Fülle an Kombinationen entspringen Hierarchien, wie sie Schließanlagen benötigen. Zum Beispiel für ein Mehrfamilienhaus: Jeder Bewohner kann mit seinem Schlüssel Haustür und allgemeine Kellerräume öffnen, darüber hinaus aber nur seine eigene Wohnung. Oder die Hierarchie für einen Schulkomplex: Der Hausmeister muss sämtliche Räume betreten können, ein Turnlehrer neben dem Lehrerzimmer und seinen Klassenräumen die entsprechenden Übungsstätten et cetera. Je komplexer ein System ist, desto mehr Kombinationen stehen zur Verfügung: Das Risiko einander ähnlicher Schlüssel wird sehr klein. Gegen unbefugtes Kopieren schützt die zum jeweiligen Schließsystem gehörenden Sicherungskarte: Nur ihr Besitzer erhält einen Nachschlüssel.

Wie aber gelingt es Einbrechern dennoch immer wieder, ihr Ziel zu erreichen? Und wie können Schlüsseldienste Personen helfen, die sich selbst ausgesperrt haben?

Wurde die Tür gar nicht verriegelt, genügt eine schlichte Scheckkarte. Zwischen Tür und Türblatt gegen die Schräge des Riegels geschoben, drückt sie ihn zurück. Diesen Trick nutzen Einbrecher auch, um in Häuser einzudringen, die »Scheckkarte« ist dann eine Metallplatte. Es lohnt also in jedem Fall, beim Verlassen eines sensiblen Bereichs wirklich abzuschließen.

Geübte öffnen Mittelklasseschlösser aber auch in wenigen Minuten. Über eine Spange bringen sie ein Drehmoment an den Zylinder. Er würde im Schloss rotieren, wären nicht die ausgefahrenen Sperrstifte. Diese werden dann nacheinander mit feinen Instrumenten abgetastet und schnappen zurück. Der Zylinder lässt sich nun genau einmal drehen. Spezielle Sicherungsriegel lassen sich auf diese Weise aber nicht überlisten. Sie reagieren empfindlich: Weil sie ja nicht sauber vom Schlüssel in Position gebracht werden, rutschen sie sozusagen an der Walze entlang, die sich auf Grund des Drehmoments bewegt. Die Sicherungsriegel verkanten und blockieren das Schloss gegen weitere unsachgemäße Bewegung.

Mancher Einbrecher bemüht sich erst gar nicht darum, ein Schloss zu öffnen. Einfache Produkte lassen sich herausziehen, aufbohren oder komplett herausschneiden. Ist der Zylinder erst einmal entfernt, kann man den Türriegel leicht mit einer Zange aus dem Türblatt herausziehen. Sicherheitstürbeschläge helfen gegen das Ziehen. Sehr gute Schlösser bestehen zudem aus harten Legierungen, haben einen Kern aus Spezialstahl und unter Umständen weitere verstärkte Bereiche. Ein spezieller Bolzen verankert den Zylinder in der Tür.

Doch auch das beste Zylinderschloss bringt keine Sicherheit, wenn es leicht zu umgehen ist. Daher muss die Tür auch wandseitig gesichert werden – durch Einbau eines speziellen Sicherheitstürblatts, das fest in der Wand verschraubt ist. ◁

Alexander Glück ist freier Journalist in Wien.

Schon römische Handwerker verstanden sich auf den Bau von schließbaren Verriegelungen. Diesen Drehschlüssel fanden Archäologen in Kalkriese, dem vermutlichen Austragungsort der Varusschlacht im Jahr 9. n. Chr.

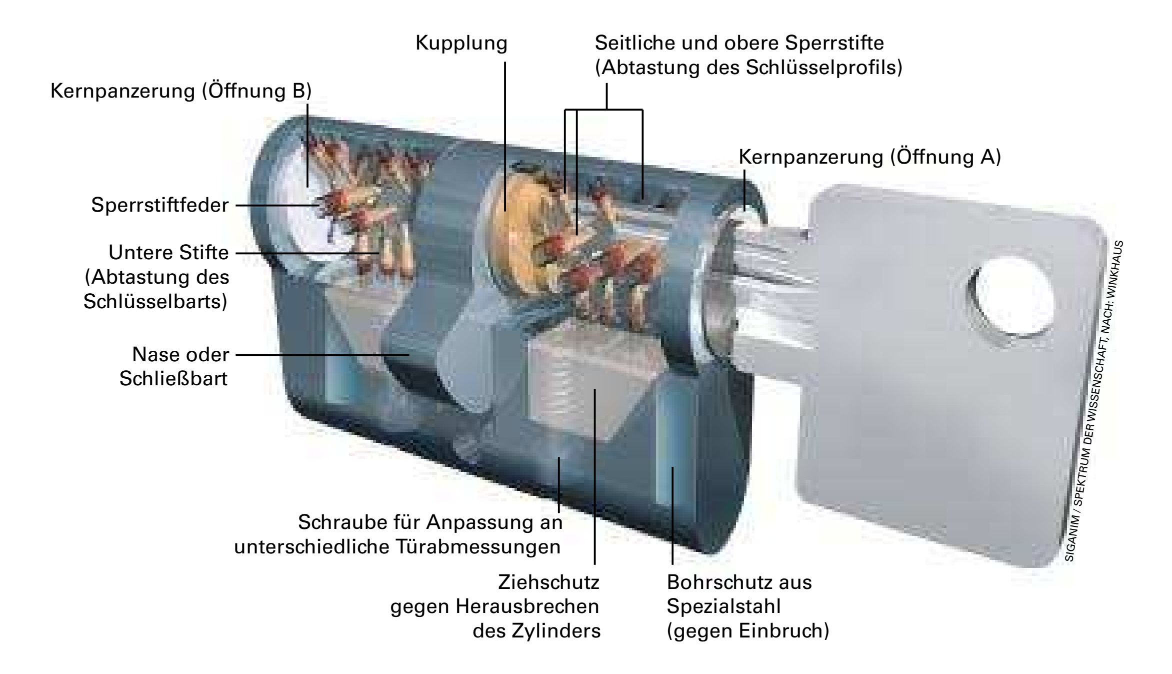
WUSSTEN SIE SCHON?

▶ **Um 1650 kamen Schlüssel mit profiliertem Bart auf**, die Schlosser Ehemann in Nürnberg und Freitag in Gera erfanden zeitgleich das Türschloss. Das Zylinderprinzip entwickelte der Amerikaner Linus Yale 1844.

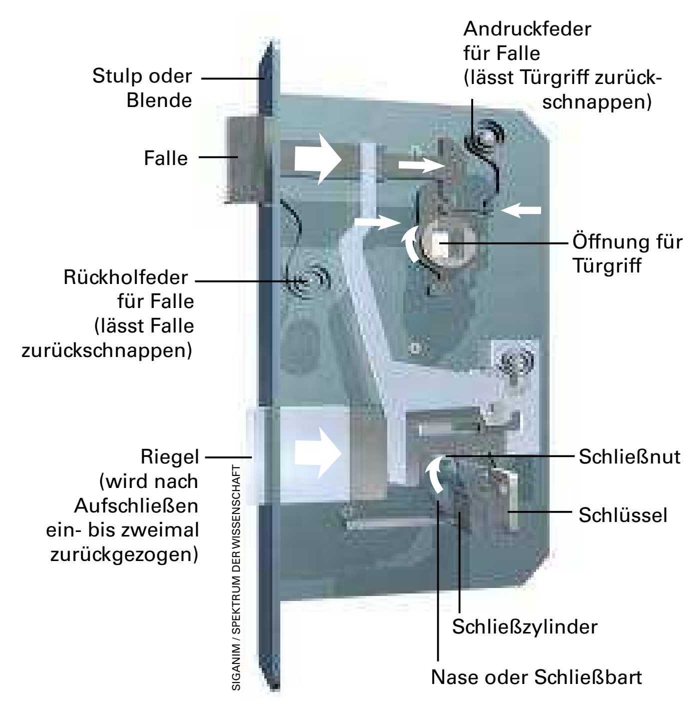
▶ **Tresorschlösser haben mehrere Riegel**, eine Erfindung aus dem Jahr 1818. Hintereinander liegende Lamellen werden von den Stufen im Schlüsselbart in die richtige Position angehoben, um jeweils einen Kanal für den Riegel freizugeben. Das aus Filmen bekannte Nummernschloss ergänzt dieses Prinzip lediglich: Wird die richtige Zahl eingestellt, fällt ein Riegel in eine andere Position und gibt die Tür frei.

▶ **Heutige Zylinderschlösser sind oft modular aufgebaut**, bestehen also aus einzelnen, kombinierbaren Zylinderelementen. Wird beispielsweise eine Tür gegen eine stärkere ausgetauscht, kann das Schloss durch Anbau weiterer Module der Türdicke angepasst werden.

▶ **Schließsysteme in Unternehmen** und sicherheitsrelevanten Einrichtungen ersetzen häufig mechanische Schlüssel durch Chipkarten. Das ermöglicht Zusatzfunktionen wie etwa die Arbeitszeiterfassung oder die Steuerung von Licht und Heizung. Gegen den Autodiebstahl wurden Funk- und Infrarotschlüssel entwickelt, die einen verschlüsselten Code senden.



▲ **Indem der Schlüssel – sofern sein Profil passt – Sperrstifte wegdrückt, kann er auch die so genannte Nase bewegen. Damit Einbrecher den Zylinder nicht aufbohren können, besteht er in hochwertigen Schlössern aus Spezialstahl.**



▶ **Der Schlüssel dreht die Nase und diese zieht einen Riegel zurück. Nun ist die Tür entsperrt. Weiterdrehen des Schlüssels oder Herunterdrücken einer Klinke betätigt dann die Falle – die Tür öffnet sich.**

Aus urheberrechtlichen Gründen können wir Ihnen die Bilder leider nicht online zeigen.

Der Untergang von Lissabon

Diesen Artikel können Sie auch anhören, siehe: www.spektrum.de/audio

Vor 250 Jahren zerstörte das schwerste Erdbeben auf dem europäischen Festland in historischer Zeit die portugiesische Hauptstadt und forderte mindestens 60 000 Todesopfer. Seine Ursache war lange umstritten, kann aber nun als weit gehend geklärt gelten.

Von Achim Kopf

Am 1. November 1755 um 9.40 Uhr Ortszeit erschüttert ein gigantischer Erdstoß die Region rund um Lissabon. Seine Stärke auf der Richterskala – fachsprachlich Magnitude – wird heute auf 8,5 bis 9 geschätzt. Kurz darauf ereignet sich ein weiteres, zwei Minuten dauerndes Beben, gefolgt von einem dritten. Kirchen, Paläste, Brücken und Türme stürzen wie Kartenhäuser in sich zusammen; insgesamt 18 000 Gebäude werden zu Schutt. Innerhalb weniger Minuten sterben 25 000 Menschen. Eine gigantische Staubwolke verdunkelt den Himmel, ehe die Stadt in Flammen aufgeht. Fünf Tage und Nächte lang wütet das Feuermeer.

Die massive Erschütterung ist in ganz Europa und bis nach Afrika sowie auf den Azoren und den Kapverden zu spüren. In Schottland und der Schweiz steigen die Wasserstände der Seen, in den Niederlanden und in Schweden reißen Schiffe aus ihren Verankerungen.

Die Lage des Bebenherds im Atlantik vor der portugiesischen Küste sorgt für den Schlussakkord der Apokalypse: Bis zu 15 Meter hohe Tsunamiwellen wälzen sich in den Hafenbezirk Lissabons, überfluten und verwüsten das gesamte Areal. Sie fordern weitere 20 000 Todesopfer. Durch das Erdbeben und seine Begleiterscheinungen verlieren mehr als 60 000

Aus urheberrechtlichen Gründen können wir Ihnen die Bilder leider nicht online zeigen.

Menschen ihr Leben, die meisten in der portugiesischen Hauptstadt, die damals 250 000 Einwohner zählt.

Diese Katastrophe, ausgerechnet am Festtag Allerheiligen im streng katholischen Portugal, hatte enorme Auswirkungen auf das geistige und kulturelle Leben in Europa. Rationale Erklärungsansätze von naturwissenschaftlicher Seite, die schon damals die Ursache in unterirdischen Bewegungen vermuteten, konkurrierten mit pauschalen Schuldzuweisungen der katholischen Kirche, die das Unglück als göttliche Strafe für die in ewiger Sünde verhafteten Menschen interpretierte.

In philosophischen Zirkeln entbrannte ein Streit über die alte Frage, wie die Allmacht, Allgüte und Allwissenheit Gottes mit der Existenz des Bösen in der Welt vereinbar sei. Der deutsche Philosoph Gottfried Wilhelm Leibniz hatte für dieses Problem 1710 den Ausdruck Theodizee geprägt und es zu lösen versucht, indem er unsere Welt als die beste aller möglichen bezeichnete. Aufklärer um Immanuel Kant, Jean-Jacques Rousseau und François-Marie Arouet Voltaire attackierten diese Sichtweise nun und traten eine hitzige Debatte über Gottes Wirken in der Natur und die Rolle des Menschen los.

Das traumatische Ereignis spiegelte sich auch vielfach in zeitgenössischen literarischen Werken wider – so bei Heinrich von Kleist, Gotthold Ephraim Lessing und Johann Wolfgang von Goethe. Politisch gesehen, verlor Portugal durch den ökonomischen und gesellschaftlichen Rückschlag seinen Platz unter den führenden Nationen, was letztlich Großbritannien zugute kam und dessen Aufstieg zur Weltmacht förderte.

Ein verheerendes Erdbeben legte am 1. November 1755 zwei Drittel der portugiesischen Hauptstadt Lissabon in Schutt und Asche und ein nachfolgender Tsunami überflutete die Hafenregion. Diese zeitgenössischen Stiche zeigen die schlimmen Auswirkungen der Katastrophe.

Monsterbeben in seismisch ruhiger Region

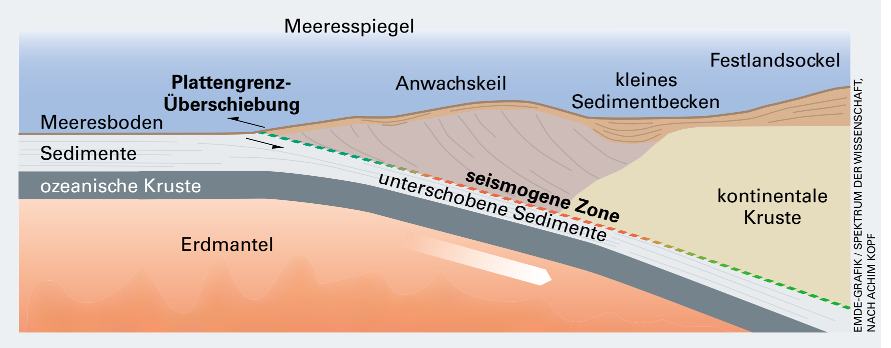
Für Naturwissenschaftler und insbesondere Geologen ist die interessanteste Frage allerdings, wieso damals ein so schweres Erdbeben ausgerechnet vor der Iberischen Halbinsel stattfand. Bis heute, ein Vierteljahrtausend später, rätseln Seismologen über den genauen Ort des Epizentrums und den Mechanismus, der die verheerenden Erschütterungen auslöste.

Geologisch betrachtet ist der Südwesten Europas eine seismisch wenig gefährdete Region. Üblicherweise treten Erdbeben an Stellen auf, wo geotektonische Platten – riesige, starre Blöcke der Erdkruste und obersten Mantelregion, die auf dem tieferen, zähplastischen Mantel treiben – aufeinander stoßen oder aneinander entlangschrammen. Das ist an der Küste Portugals nicht der Fall. Hier setzt die weniger als zehn Kilometer dicke, basaltische Ozeankruste fugenlos an der durchschnittlich vierzig Kilometer mächtigen, granitischen Kontinentalplatte an. Geologen sprechen daher von einem passiven Kontinentalrand.

Anders verhält es sich beispielsweise im Westen Nordamerikas. Hier liegt zwischen Kontinent und Meeresgrund eine tief reichende Scherfläche, an der entlang sich der Festlandsockel über die sedi- ▷

Wo und wie Erdbeben entstehen

Meist ereignen sich schwere Erdbeben an Subduktionszonen, an denen sich eine ozeanische Platte unter einen Kontinent schiebt. Die Sedimente auf dem Meeresboden werden dabei teils abgeschabt und zu einem »Anwachskeil« aufgeschoben und teils mit in die Tiefe geführt. Dort fungieren sie zunächst als Gleitmittel. Mit zunehmendem Druck und steigender Temperatur in der Tiefe werden sie jedoch entwässert. Dadurch erhöht sich die Reibung, und die abtauchende Platte kann sich »festfressen«. Mit der Zeit baut sich so Spannung auf, die sich schließlich in einem Erdbeben entlädt, wenn der blockierte Bereich plötzlich aufbricht. Unterhalb dieser seismogenen Zone verhält sich Gestein dagegen plastisch: Es verformt sich, statt zu brechen.



EMDE-GRAFIK / SPEKTRUM DER WISSENSCHAFT, NACH ACHIM KOPF

mentbefrachtete Ozeankruste schiebt – ein Vorgang, der als Subduktion bezeichnet wird (Kasten oben). An solchen Kollisionszonen entladen sich rund neunzig Prozent aller durch die Plattendrift aufgebauten Spannungen ruckartig in so genannten Überschiebungserdbeben. Wie kommt es dazu?

Auf der Ozeankruste hat sich je nach ihrem Alter im Lauf der Jahrmillionen ein bis zu mehrere Kilometer dickes Paket von Sedimenten abgelagert. Sie bestehen aus Abtragungsschutt der Kontinente, der über Flusssysteme, den Wind oder gravitativen Transport vom Land ins Meer verfrachtet wird. Naturgemäß sammelt sich dieses Material im Tiefseegraben, der Nahtstelle der beiden kollidierenden Platten. Diese Sedimente – und insbesondere die enthaltenen feinen Tonminerale – wirken als eine Art Schmiermittel, welches das Abtauchen der ozeanischen Platte erleichtert. Unmittelbar am Meeresboden enthalten sie im Raum zwischen den Partikeln bis zu achtzig Prozent Meerwasser.

Diese Porosität nimmt mit der Tiefe exponentiell ab, da steigende Temperaturen und das Gewicht der überlagernden Schuttmassen das Wasser austreiben und eine kompaktere Anordnung der Teilchen erzwingen. Hinzu kommt eine seitliche Einengung; denn bei der Subduktion schabt der Kontinentalrand, während er sich über die ozeanischen Kruste schiebt, Sediment von ihr ab und türmt es wie ein Schneepflug in einem so genannten Anwachskeil vor sich auf. Neues Material, das bei der Kollision in die Subduktionszone gerät, wird dann in oder unter diese Struktur geschoben und dabei ausgepresst. Dadurch nimmt in der Sedimentdecke auf der ozeanischen Kruste der Entwässerungsgrad auch zum Kontinent hin exponentiell zu. In der Tiefe entsteht so eine Region mit geringem Wassergehalt, in der die Schmierung zwischen den Platten nurmehr schlecht ist und starke Reibungskräfte auftreten.

Spannung entlädt sich gewaltsam

In dieser so genannten seismogenen Zone können Erdbeben entstehen. Das geschieht immer dann, wenn die Bewegung entlang der Gleitfläche kurzzeitig stockt, weil unebene Stellen sich ineinander verhakt haben. Da die Platten weiter aufeinander zutreiben, baut sich Spannung auf. Diese übersteigt schließlich den Zusammenhalt des Gesteins, sodass es bricht und die Verkeilung sich plötzlich löst. Dabei rutscht die Kontinentalplatte in der Regel ruckartig um einige Zentimeter weiter – es kommt zum Erdstoß. Unterhalb der seismogenen Zone, wo die Temperatur 350 Grad Celsius übersteigt, verhalten sich die Sedimentgesteine dagegen nicht mehr spröde, sondern duktil: Sie verformen sich bei hoher Spannung, geben also nach, statt zu brechen.

Neben dem Erdstoß ruft die schlagartig vorrückende Kontinentalplatte noch einen zweiten, ebenso fatalen Effekt hervor. Da ihr äußerer Rand unter dem Meeresspiegel liegt, verlagert er beim Erdstoß den darüber liegenden Wasserkörper und verursacht eine Welle, die konzentrisch vom Bebenherd wegläuft (Bild auf S. 89). So entsteht ein Tsunami (japanisch für Hafenwelle), wie er Ende letzten Jahres nach dem schweren Erdbeben vor Sumatra auftrat und eine der schlimmsten Naturkatastrophen der Menschheitsgeschichte auslöste (Spektrum der Wissenschaft 2/2005, S. 10).

In der Tiefsee haben diese tückischen Wogen geringe Amplituden und sehr große Wellenlängen. Dabei rasen sie mit Geschwindigkeiten durch den Ozean, die mehr als 700 Kilometer pro Stunde erreichen. Am Kontinentalschelf werden sie gebremst. Während die Länge der Wellenberge abnimmt, steigt ihre Höhe. So kann sich der Tsunami an der Küste schließlich bis über dreißig Meter hoch auftürmen und alles niederwalzen, was ihm in den Weg kommt.

Vom Erdbeben in Lissabon gibt es natürlich keine seismischen Aufzeichnungen. Anhand der geologischen Verhältnisse und zeitgenössischer Berichte ließ sich aber nachträglich sowohl die Stärke der Erdstöße abschätzen als auch das Epizentrum lokalisieren und die Kinematik der Tsunamis rekonstruieren (Bild auf S. 88 oben). Mit einer Magnitude von 8,5 bis 9 erreichte die Erschütterung fast die Zerstörungskraft des verheerenden Seebebens vor Sumatra Ende letzten Jahres. Dennoch bleibt eine Restunsicherheit. Das liegt vor allem an den komplexen tektonischen Verhältnissen am Schnittpunkt zwischen Afrika und Europa sowie zwischen Mittelmeer und Atlantik.

Wie erwähnt, gehen Europa und Nordafrika kollisionslos in die atlantische Ozeankruste über. Dieser passive Kontinentalrand wird aber von der so genannten Gloria-Blattverschiebung zerschnitten, die senkrecht zu ihm verläuft. Sie bildet die untermeerische Fortsetzung der Grenze zwischen Europäischer und Afrikanischer Platte und zieht vom Mittelatlantischen Ozeanrücken ostwärts. Dabei verspringt sie mehrfach um bis zu einige Dutzend Kilometer, quert die Azoren, kreuzt die ausgedehnte Schwellenregion der Gorringe-Bank und mündet

schließlich in den Golf von Cádiz, eine Bucht an der spanischen Südwestküste. Weiter im Osten durchläuft sie Gibraltar und wird zur Subduktionszone, an der sich die Afrikanische Platte unter Eurasien (die Landmasse Europas und Asiens, die geologisch eine Einheit darstellt) schiebt. Dadurch verengen und schließen sich nach und nach weite Teile des Mittelmeers. Vor allem in seiner Osthälfte hat die abtauchende Afrikanische Platte einen gigantischen submarinen Gebirgszug aufgetürmt: den Mittelmeerrücken.

Störungszone westlich der Straße von Gibraltar

In der Alboran-See im westlichen Mittelmeer dagegen dehnt sich die Ozeankruste. Zugleich wird von den umgebenden Höhenzügen, der Betischen Kordillere in Spanien und dem Rif-Gebirge in Marokko, Gestein abgetragen. Das erodierte Material hat westlich der Straße von Gibraltar einen gewaltigen Keil an Lockersedimenten aufgehäuft (Bild unten). Er ist etliche Kilometer mächtig und mit den normalen Ablagerungen am atlantischen Meeresboden verzahnt, wodurch er eine Störungszone bildet.

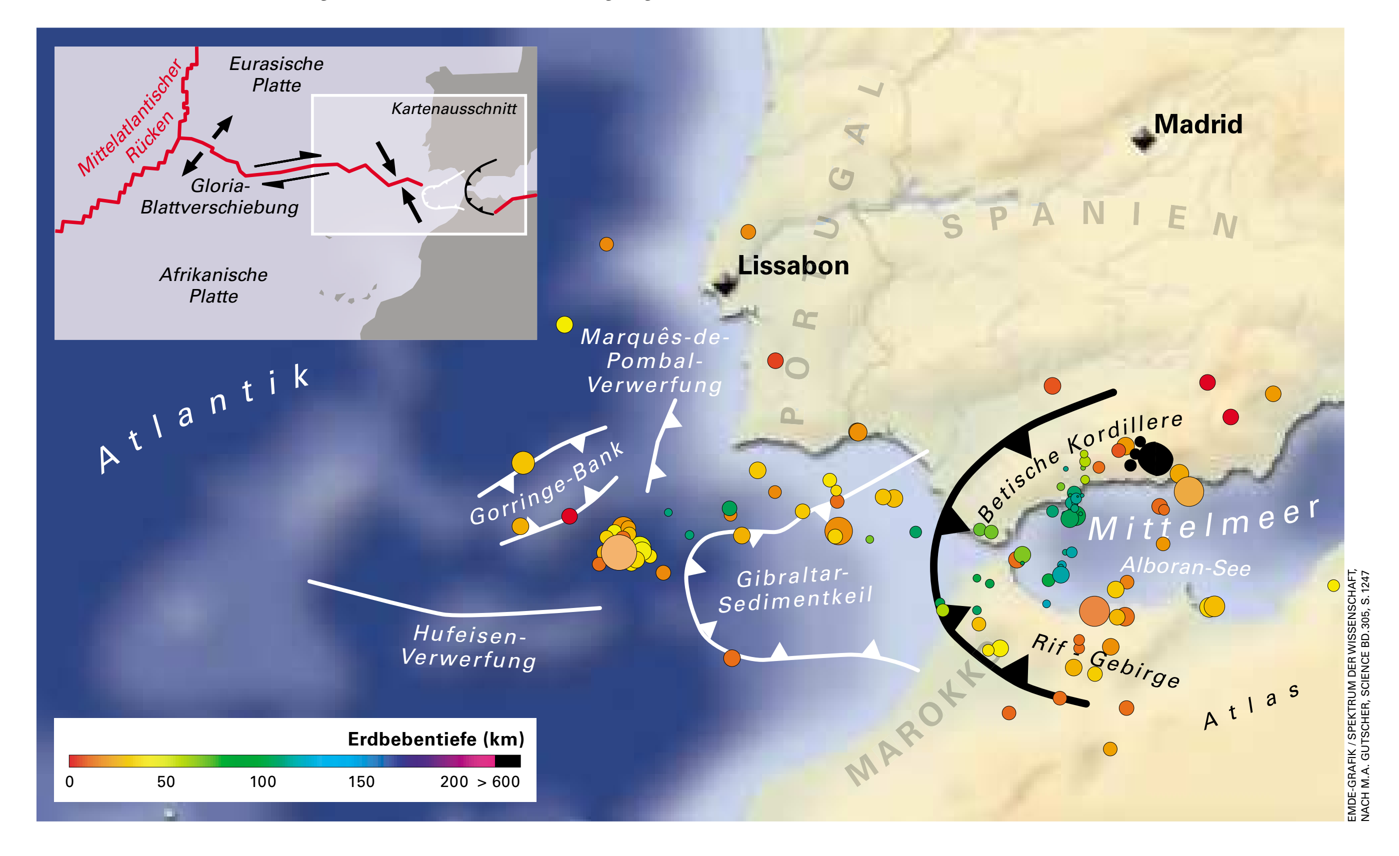
Dabei ist die Interpretation dieser Struktur umstritten. Während einige Geophysiker darin nur eine Fortsetzung der Gloria-Blattverschiebung sehen, deuten andere das Gebilde als Anwachskeil einer Subduktionszone, von der das Beben ausging. Wieder andere vermuten das Epizentrum näher an Lissabon selbst. Diese Gruppe zerfällt ihrerseits in zwei Fraktionen. Die einen halten die Gorringe-Bank für den Bebenherd, während die anderen die Marquês-de-Pombal-Region favorisieren, die nicht weit entfernt von der portugiesischen Küste liegt und sich östlich an eine gleichnamige Verwerfung anschließt.

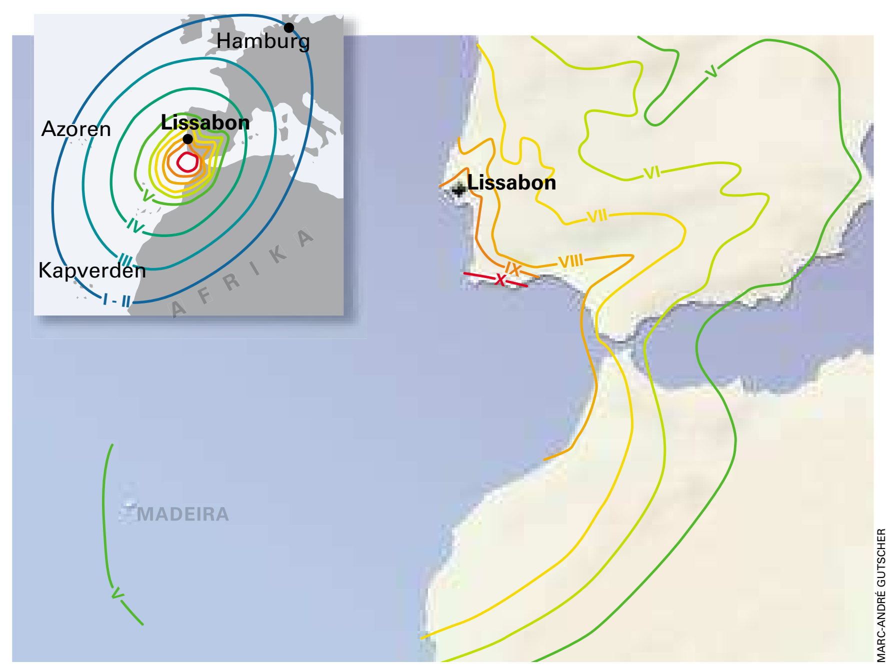
Prinzipiell kann man für jede der vier Hypothesen Argumente anführen. Diese lassen sich letztlich nicht widerlegen, weil die historischen Zeugnisse von 1755 lückenhaft sind und direkte Messdaten aus dieser Zeit nicht vorliegen. Dennoch ist es möglich, die Plausibilität der einzelnen Vorstellungen zu bewerten.

So erscheint ein Beben entlang der Gloria-Blattverschiebung aus einem simplen Grund äußerst unwahrscheinlich: Beim bloßen seitlichen Aneinander-Entlanggleiten zweier Krustenblöcke, wie das für eine solche Verwerfung typisch ist, findet keine nennenswerte Vertikalbewegung statt. Folglich wird auch kaum Wasser verdrängt, was die Voraussetzung für einen Tsunami wäre. Ein solches Erdbeben ereignete sich zum Beispiel 1969 an der Hufeisen-Verwerfung, einem Blattverschiebungssegment zwischen der Gorringe-Bank und dem Golf von Cádiz. Obwohl es mit einer Magnitude von 7,9 ziemlich stark war, rief es keinen Tsunami hervor und richtete auch sonst keinen messbaren Schaden an.

Die Marquês-de-Pombal-Region wiederum misst nur 700 Quadratkilometer und dürfte deshalb zu klein sein, um einen Erdstoß der Magnitude 8,5 oder mehr zu erzeugen. Anders verhält es sich mit der Gorringe-Bank, an der Krustenschichten der Europäischen und Afrikanischen Platte miteinander verschuppt sind. Sie reicht bis 25 Meter unter den ▷

Als Ausgangspunkt des Erdbebens von Lissabon kommen vier geologische Strukturen im Atlantik in Frage: die Marquês-de-Pombal-Verwerfung, die Gorringe-Bank, die Hufeisen-Verwerfung und ein Sedimentkeil westlich von Gibraltar. In dieser Region wurden auch in neuer Zeit viele – allerdings schwächere – Erdbeben registriert, die hier je nach ihrer Stärke durch Punkte unterschiedlicher Größe dargestellt sind. Die Hufeisen-Verwerfung gehört zur Gloria-Blattverschiebung, die vom Mittelatlantischen Rücken zum Golf von Cádiz zieht und die Afrikanische von der Eurasischen Platte trennt.





Aus historischen Berichten ließ sich die Intensität des Erdbebens von Lissabon in Abhängigkeit von der Distanz zum Epizentrum rekonstruieren. Am Südwestzipfel Portugals erreichte es demnach die Stufe 10 auf der Mercalli-Skala. Selbst in Hamburg, auf den Azoren und den Kapverden war es noch zu spüren.

▷ Meeresspiegel hinauf und kommt von ihrer Geometrie her prinzipiell als Bebenherd in Frage. Allerdings müsste der Meeresboden längs der Verwerfung ruckartig um deutlich mehr als 20 Meter verrutscht sein, um die Stärke der seismischen Erschütterungen von 1755 zu erklären. Ein derart hoher Versatz bei einem einzelnen Ereignis erscheint in diesem geologischen Umfeld jedoch sehr unwahrscheinlich. Bei jüngsten Erdstößen im Bereich der Gorringe-Bank, die mit neuester Messtechnik erfasst wurden, traten jedenfalls nur Rutschungen von wenigen Metern entlang der seismogenen Störungsbahn auf. Zudem wäre das 1755er Beben in Südmarokko nicht so stark gespürt worden, hätte das Epizentrum so weit im Norden gelegen.

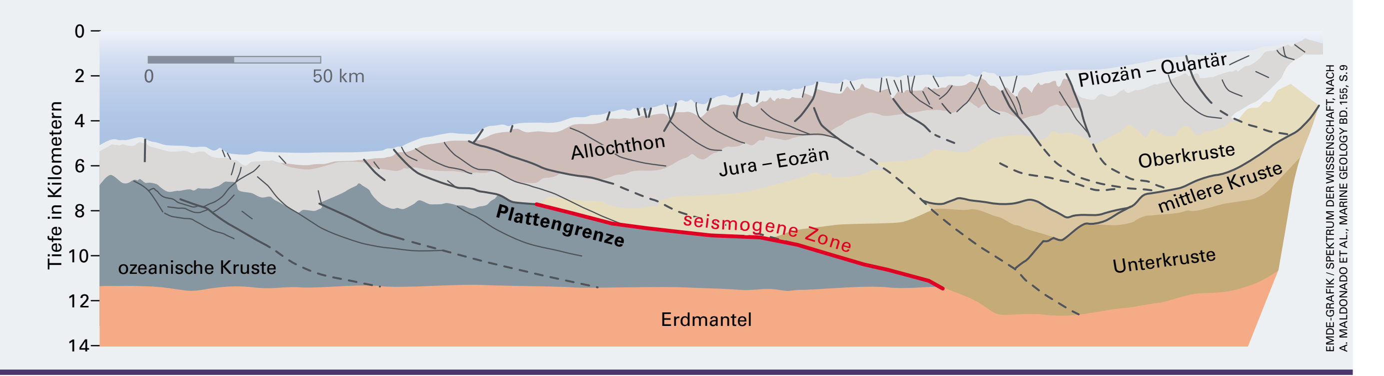
Von den vier Regionen, die als Bebenherd in Frage kommen, ist die Basis des Sedimentkeils westlich der Straße von Gibraltar also am wahrscheinlichsten – jedenfalls, wenn man von einem einzelnen Ereignis als Erdbebenauslöser ausgeht. Forschergruppen aus Frankreich und Spanien haben diese Region kürzlich mit seismischen und tomografischen Verfahren bis in 1500 Kilometer Erdtiefe durchleuchtet. Auf ihren Bildern zeichnet sich eine Struktur ab, die sich als Krustensegment interpretieren lässt, das nach Osten unter das Mittelmeer sinkt (Kasten unten). Demnach könnte es sich in der Tat um eine Subduktionszone handeln, die möglicherweise heute nicht mehr aktiv ist. Sie hat die erforderliche Geometrie, um ein Überschiebungserdbeben erklären zu können.

Bei einer jährlichen Drift von zehn Millimetern ergäbe sich in nur 1000 bis 2000 Jahren eine Netto-Bewegung um zehn bis zwanzig Meter. Angesichts einer Ausdehnung der Krustenscholle von etwa 40 000 Quadratkilometern würde, wenn diese Bewegung blockiert wäre und die aufgebaute Spannung sich ruckartig entlüde, rechnerisch eine seismische Erschütterung mit einer Magnitude von 8,6 bis 8,8 ausgelöst – was exakt mit dem nachträglichen Schätzwert für das Erdbeben von Lissabon übereinstimmt.

Dazu passen auch die Ergebnisse jüngster Computersimulationen. Da sich die geologischen Verhältnisse in Südwesteuropa extrem langsam ändern – so schiebt sich Afrika pro Jahr nur um rund vier Millimeter unter Eurasien –, kann

Blick in den Untergrund

Seismische Untersuchungen und Ergebnisse von Bohrungen lieferten diesen schematischen Querschnitt durch den Meeresboden westlich der Straße von Gibraltar. Demnach schieben sich hier ozeanische und kontinentale Kruste übereinander. Die Grenze zwischen beiden befindet sich teils in einem Druck-Temperaturmilieu, wo Erdbeben entstehen können. In der Kollisionszone der beiden Platten wird das aufliegende Sediment ineinander geschoben und verfaltet. Die Ablagerungen reichen zurück bis in das Erdmittelalter. Unter der jüngsten Schicht (Pliozän-Quartär) liegt eine ausgedehnte »allochthone« Einheit aus ortsfremdem Material, das aus den nahe gelegenen Gebirgen eingetragen wurde.



man numerischen Modellen zur Rekonstruktion der Ereignisse vor einem Vierteljahrtausend die heutige tektonische Situation zu Grunde legen, ohne einen allzu großen Fehler zu machen. Außerdem verfügen wir, auch wenn keine exakten Messergebnisse vorliegen, doch über eine Fülle von Augenzeugenberichten. So hat der seinerzeitige Premierminister von Portugal, der Marquês de Pombal, in einer Umfrage an alle Pfarreien Informationen zu dem Erdbeben und seinen Folgen gesammelt.

Rekonstruktion des Tsunamis

Aus diesem Grund sind zum Beispiel die Höhe und Ankunftszeit der Tsunamiwelle an verschiedenen Orten entlang den Küsten der Iberischen Halbinsel, Nordafrikas, der Azoren und der Kapverden bekannt. Seismologen können nun einem Computermodell diese Rahmendaten einfüttern und es die Bedingungen errechnen lassen, unter denen das historisch dokumentierte Überflutungsmuster reproduziert wird. Dabei ergeben sich – mit gewissen Unsicherheiten – auch Rückschlüsse auf den Ausgangspunkt des Erdstoßes und den Versatz an der tektonischen Verwerfung, an der es entsprang.

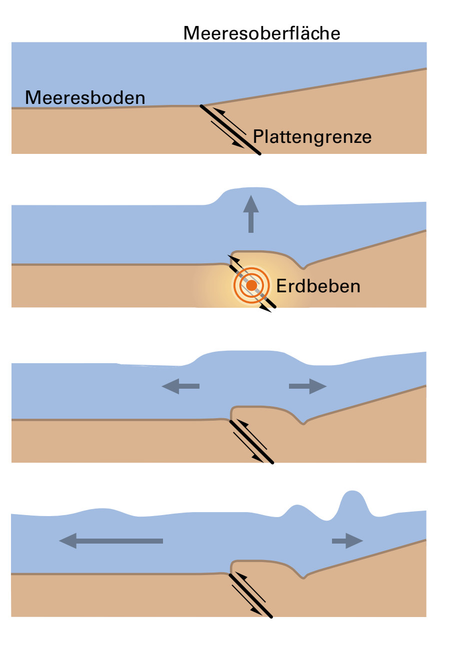
Für ein Überschiebungsbeben, ausgelöst von einer 40000 Quadratkilometer großen Scholle, die sich vor der Meerenge von Gibraltar westwärts bewegt, stimmen die Resultate sehr gut mit den Augenzeugenberichten überein (Bild auf S. 90 unten). So bestätigt das Model, dass schon eine Viertelstunde nach dem Erdstoß eine mehr als zehn Meter hohe Flutwelle die Küste am Kap St. Vincent in Südportugal heimsuchte. Minuten später ereilten viele Regionen der spanischen, portugiesischen und marokkanischen Atlantikküste das gleiche Schicksal. In Cádiz und Lissabon, die am Ende tief eingeschnittener Buchten liegen, traf der Tsunami dagegen erst nach über einer Stunde ein. Noch später erreichte er Porto im Norden Portugals und Madeira.

Interessanterweise zeigt die Simulation, dass der vertikale Versatz der Krustenblöcke gar nicht übermäßig groß gewesen sein muss, um die weit reichenden, verheerenden Folgen zu erklären. Demnach hat sich die Scholle aus Kontinentalgestein bei ihrem ruckartigen Sprung in Richtung Atlantik an ihrem vorderen Rand nur um etwa elf Meter gehoben, während der Meeresboden dahinter um sechs Meter absackte.

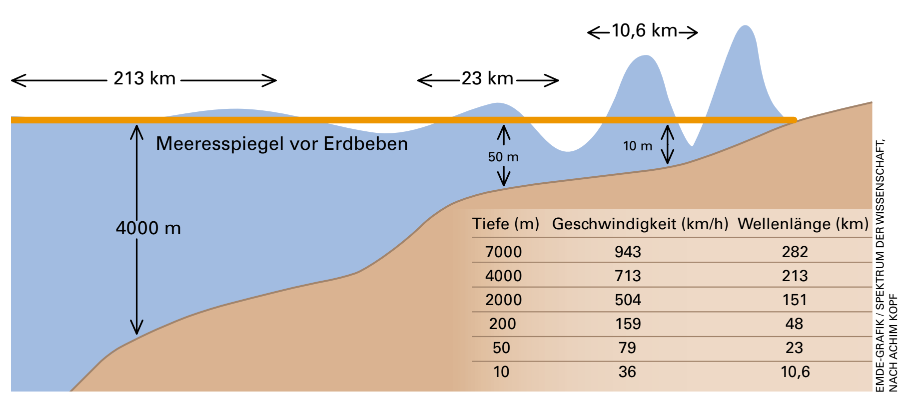
Es gibt aber nicht nur Augenzeugenberichte, sondern auch stumme Zeugen am Meeresgrund, die Rückschlüsse auf das einstige Geschehen erlauben. Sie stützen gleichfalls die Hypothese eines Überschiebungsbebens am Anwachskeil westlich der Straße von Gibraltar. Starke Erdstöße, deren Epizentrum im Meer liegt, lösen an submarinen Abhängen oft Rutschungen aus. Dabei kommt es zu so genannten Trübeströmen aus Lockermaterial, das sich von der Hangwand löst und in die Tiefe gleitet. Dort bildet es Sedimente mit einer charakteristischen Schichtung, die von der im normalen Meeresgrund abweicht – Geologen sprechen von Turbiditen. Aus der Suspension fallen zunächst grobkörnige Sande aus, die zum Nanofossilschlamm darunter eine scharfe Grenze bilden. Später folgt mittelgrobes, dann feineres Material, sodass eine Gradierung entsteht. Jede Sequenz von grob bis fein kennzeichnet eine Hangrutschung.

Turbidite erscheinen auch in Bohrkernen vor der Iberischen Halbinsel – etwa im Golf von Cádiz (Bild auf S. 91). Über zwanzig solche Ablagerungen fanden portugiesische, britische und deutsche Forscher hier in einer Abfolge von Sedimenten, die bis etwa 35000 Jahre in die erdgeschichtliche Vergangenheit zurückreicht. Daraus ergibt sich, dass vor Cádiz etwa alle 1000 bis 2000 Jahre ein Starkbeben stattfand. Tatsächlich treten Erdstöße oft in relativ regelmäßigen Intervallen auf, die jedoch regional schwanken. Je langsamer die kollidierenden Platten gegeneinander vorrücken, desto länger ist der Abstand zwischen zwei Beben.

Die jüngste Turbiditablagerung im Golf von Cádiz konnte auf ein Alter von ziemlich genau 250 Jahren datiert werden. Seither hat sich hier nur noch wenig Sediment abgesetzt. Anhand der Verteilung der Turbidite in verschiedenen Teilen des Golfes von Cádiz sowie ihrer lokalen Mächtigkeit, die zwischen zwanzig Zentimetern und zwei Metern variiert, haben Forscher zudem abgeschätzt, welche Menge an Gestein seinerzeit ab- ▷



◁ **Wenn sich bei einem Überschiebungserdbeben der Boden ruckartig hebt, wird großflächig Meerwasser verdrängt. Es weicht nach oben und zur Seite aus. Dabei erzeugt es einen Tsunami: eine Woge, die im tiefen Meer eine sehr große Wellenlänge und nur eine geringe Amplitude hat. Sie breitet sich dort mit der Geschwindigkeit von Düsenjets aus. In seichteren Küstenregionen wird der Tsunami abgebremst. Dabei verringert sich seine Wellenlänge, und die Amplitude nimmt zu.**



Tiefe (m)	Geschwindigkeit (km/h)	Wellenlänge (km)
7000	943	282
4000	713	213
2000	504	151
200	159	48
50	79	23
10	36	10,6



ACHIM KOPF

Diese an der Universität Bremen entwickelte Langzeitstation misst im Meeresboden Parameter wie Temperatur und Porendruck, die für die Vorhersage von Erdbeben relevant sind. Nach einer vorprogrammierten Zeitspanne löst sich die obere Kugel ab, steigt zum Wasserspiegel auf und sendet die gespeicherten Daten per Funk an die Wissenschaftler.

gerutscht ist. Demnach löste sich mehr als ein Kubikkilometer Material und sank in tiefere Beckenregionen.

Ähnlich den Turbiditen sind auch die Ablagerungen von Tsunamis datierbar. Eine solche Flutwelle kann je nach ihrer Höhe einige hundert Meter weit über die Küstenlinie schwappen und Lagunen, Buchten oder sogar Flussläufe hinaufwandern, ehe sich die mitgerissene Sedimentfracht erneut absetzt. Weit hinter natürlichen Barrieren oder Deichen bildet sich dabei typischischerweise ein schlecht sortiertes Potpourri aus groben Partikeln, meist Sanden und Schutt. So fand sich in der Region um Cádiz landeinwärts einer sechs Meter hohen Sandbarriere eine Tsunami-Ablagerung, die zeitlich mit dem 1755er Lissabonbeben zusammenfällt. Eine ältere, ähnlich zusammengesetzte Schicht darunter hatte dagegen ein Alter von etwa 2200 Jahren.

Falls beide Turbidite von Erschütterungen am selben Bebenherd stammen, erhalten wir auch eine Antwort auf eine weitere sehr wichtige Frage: Wann ist in der Region der nächste katastrophale Erdstoß zu befürchten? Wenn das vorletzte schwere Beben um 200 v. Chr. stattfand, beträgt die Wiederkehrspanne knapp 2000 Jahre. Dieser Wert stimmt relativ gut mit den durchschnittlich 1700 Jahren überein, die sich aus den Turbiditabfolgen ergeben.

Statistisch betrachtet, müsste die Region im Südwesten der Iberischen Halbinsel also vorerst ungefährdet sein. Allerdings haben sich im näheren Umkreis in jüngerer Vergangenheit schwere Erdbeben ereignet – so 1969 eines der Stärke 7,9 an der Hufeisen-Verwerfung (Bild auf S. 87). Auch im benachbarten westlichen Mittelmeer kommt es immer wieder zu heftigen seismischen Erschütterungen, zuletzt im Mai 2003 und Januar 2004 in der Region um Thenia im Norden Algeriens sowie im Februar 2004 in der marokkanischen Stadt Al-Hoceima.

Forscher unternehmen deshalb große Anstrengungen, die Erdbebenmechanismen nahe der Iberischen Halbinsel genauer zu verstehen. Bei jüngsten marinen Expeditionen – unter anderem mit dem deutschen Forschungsschiff »Sonne« – ging es darum, die kritischen Kontrollparameter für den mechanischen Bruch und Spannungsabbau im Untergrund zu messen. Oft kündigt sich das Versagen und plötzliche Rutschen der Verwerfung in der Tiefe schon Tage bis Wochen im Voraus an. Deshalb sind die Geologen bestrebt, Langzeit-Observatorien im Meeresboden zu installieren, die über die Schwankungen von Temperatur und Druck im Untergrund Aufschluss geben.

Die Temperatur ist insofern wichtig, als sie die mechanische Reibungswärme zwischen den Krustenplatten anzeigt. Das Wasser in den Poren mariner Sedimente hat eine hohe Wärmekapazität und transportiert das Temperatursignal aus der Erdtiefe über kleine Kanäle und Risse im Gesteinskörper zum Meeresboden. Auch Druckschwankungen, die auf Krustenbewegungen und Gesteinsdeformationen zurückgehen, werden über das poröse Netzwerk nach oben geleitet. Folglich können Stationen, die an geeigneter Stelle einige bis mehrere Dutzend Meter in das Ozeanbodensediment eingelassen sind, wichtige Daten über Prozesse sammeln, die in Tiefen von etlichen hundert Metern oder gar Kilometern stattfinden.

Sensoren am Meeresgrund

Eine solche Station, die Geophysiker an der Universität Bremen entwickelt haben, wurde kürzlich testhalber für einen Monat im Golf von Cádiz installiert (Bild oben). Das Sappi genannte Gerät (*satellite-linked autonomous pore pressure instrument*, unabhängiges satellitengestütztes Porendruck-Messgerät) ermittelt gleichzeitig die Temperatur und den Porenwasserdruck in verschiedenen Tiefen. Dazu dienen Sensoren, die entlang einer Messlanze angebracht sind. Diese dringt allein durch ihr Eigengewicht in den zumeist weichen Schlamm ein und wird von einem Metallschirm am völligen Versinken gehindert.

Anhand historischer Berichte über die Höhe und Ankunftszeit der Flutwelle an verschiedenen Orten entlang den Küsten der Iberischen Halbinsel, Nordafrikas, der Azoren und der Kapverden ließ sich der Tsunami nach dem Erdbeben von Lissabon am Computer simulieren. Gezeigt sind vier Stadien der Ausbreitung in der ersten Stunde.

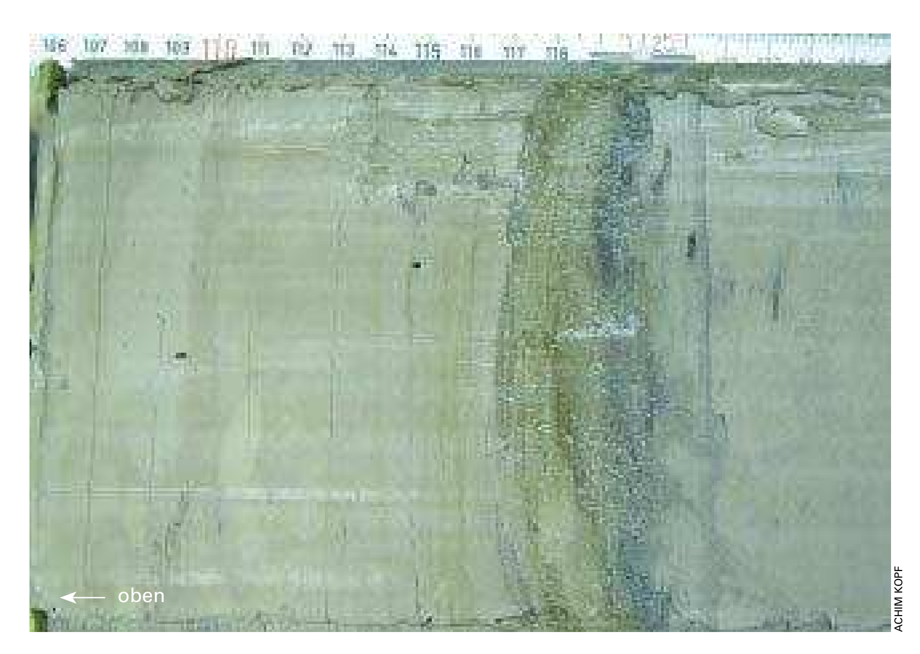
Wellenhöhen in Metern:
−6 0 +10
Atlantik
IBERISCHE HALBINSEL
Lissabon
AFRIKA
nach 16 Minuten





EMDE-GRAFIK / SPEKTRUM DER WISSENSCHAFT, NACH MARIA-ANA BAPTISTA

Seebeben lösen oft Rutschungen an submarinen Hängen aus. Das abgelöste Material kann mehrere hundert Kilometer weit in die Tiefsee getragen werden. Die daraus gebildeten Turbidite bestehen zuunterst aus grobkörnigen Sanden, die sich deutlich von den Nanofossil-Schlämmen des Tiefseebodens unterscheiden. Darüber folgt mittelgrobes und schließlich feines Material, ehe wieder normale Tiefseeablagerungen dominieren. Ein solcher Turbidit ist in diesem Sedimentkern aus rund 3500 Meter Wassertiefe im Golf von Cádiz zu erkennen.



ACHIM KOPF

Aus den Messdaten lassen sich dann der Wärmestrom und Druckschwankungen ableiten, die mit dem Spannungsabbau und Fluidfluss in der tieferen Erde einhergehen. Eine Elektronikeinheit, die sich in einer wasser- und druckresistenten Kapsel befindet, schreibt die Daten auf eine Festplatte. Darüber sitzt eine zweite Kugel, die als Auftriebsboje fungiert. Sobald der einprogrammierte Messzeitraum abgelaufen ist, löst diese sich ab, schwimmt zur Meeresoberfläche und sendet den Inhalt der Festplatte per Satellit zur Universität Bremen.

Zukunftsvision der Forscher ist, diese Sonden über Zeiträume von Jahren zu betreiben und mit einer direkten Daten- und Stromleitung zu versorgen. Dann wäre eine Erdbebenüberwachung in Echtzeit möglich. Je tiefer sich die Messsonde im Meeresgrund verankern lässt – zum Beispiel als Installation in Bohrlöchern –, desto verlässlicher sind die Daten.

Erfahrungen an Land zeigen, dass Anomalien im Boden sehr wohl auf bevorstehende Erdbeben hindeuten können. Ein Beispiel liefert der Kaukasus, der durch die Kollision des Arabischen Blocks mit Eurasien entstand. Dabei wurden Sedimentgesteine, die noch Wasser und Gas enthielten, tief in den Untergrund gedrückt. Dieses Material dringt heute auf Grund seines geringen spezifischen Gewichts nach oben und tritt in so genannten Schlammvulkanen aus (Spektrum der Wissenschaft 1/2003, S. 38). Dabei bilden sich flachkeglige Dome aus Ton und Sand, die hydrologisch wie geodynamisch mit der tiefen Erde in Verbindung stehen.



Als »Überdruckventile« werden diese Vulkane, wie historische Berichte belegen, regelmäßig einige Tage vor großen Erdbeben aktiv. Sie stoßen dann verstärkt Gas – hauptsächlich Methan – und Wässer aus, die in kleinen Rinnsalen abfließen. Wissenschaftler aus Georgien und Asserbaidschan fanden heraus, dass sich die chemische Zusammensetzung dieser Austrittsprodukte vor Erdbeben ändert. Wenn sich der plötzliche Spannungsabbau anbahnt, werden vermutlich Krustenfluide freigesetzt und steigen an Verwerfungen entlang zur Oberfläche auf.

Unter Wasser lassen sich solche Warnzeichen natürlich sehr viel schlechter beobachten. Dabei wäre es gerade hier besonders wichtig – schließlich liegen, wie eingangs erwähnt, rund neunzig Prozent aller Bebenherde in küstennahen Meeresregionen. Zwar sind wir technologisch so weit, die sensible Elektronik in Kapseln vor dem hohen Druck am Meeresgrund schützen zu können. Aber die Versorgung der Messstation mit Energie stellt immer noch eine enorme Herausforderung dar. Trotz der eklatanten Bedrohung durch Erdbeben und Folgeerscheinungen wie Tsunamis wird es also noch geraume Zeit dauern, bis ein wirksames Netz von submarinen Überwachungsstationen erstellt ist, das Schwankungen im Stressfeld der Erde zur Frühwarnung gefährdeter Regionen nutzt. Für Lissabon steht zu wünschen, dass das vor dem Ablauf der – zum Glück vermutlich noch langen – Frist bis zum nächsten Megabeben geschieht. ◁

AUTOR UND LITERATURHINWEISE



Achim Kopf ist promovierter Geologe und Professor für Marine Geotechnik am DFG-Forschungszentrum »Ozeanränder« der Universität Bremen. Er befasst sich seit Jahren mit der Entstehung von Erdbeben in Subduktionszonen und hat an verschiedenen Kontinentalrändern gearbeitet. Vor der Küste Iberiens untersuchte er kürzlich auf einer Expedition mit dem deutschen Forschungsschiff kritische Parameter für den mechanischen Bruch und Spannungsabbau im Untergrund dieser Region.

Das Erdbeben von Lissabon. Von Matthias Georgi. Primus, Darmstadt 2005

What caused the great Lisbon earthquake? Von Marc-André Gutscher in: Science, Bd. 305, S. 1247; 27.8.2004

New study of the 1755 earthquake source based on multi-channel seismic survey data and tsunami modeling. Von Maria Ana Baptista et al. in: Natural hazards and earth system sciences, Bd. 3, S. 333, 2003

Evidence for active subduction beneath Gibraltar. Von Marc-André Gutscher et al. in: Geology, Bd. 30, S. 1071, 2002

Weblinks zu diesem Thema finden Sie bei www.spektrum.de unter »Inhaltsverzeichnis«.

Vielecke im Waschbecken

Der Einfallsreichtum der Jungforscher, die am 17. European Union Contest for Young Scientists teilnahmen, kannte keine Grenzen.



wissenschaft in die schulen!

Wollen Sie Ihren Schülern einen Anreiz zu intensiver Beschäftigung mit der Wissenschaft geben? »Wissenschaft in die Schulen!« bietet teilnehmenden Klassen einen Klassensatz **»Spektrum der Wissenschaft«** oder **»Sterne und Weltraum«** kostenlos für ein Jahr, dazu didaktisches Material und weitere Anregungen.
www.wissenschaft-schulen.de

Von Uwe Reichert

Den Wettbewerb »Jugend forscht« auf Regional- und Bundesebene kennt fast jeder. Kaum bekannt hingegen ist, dass die Nachwuchsforscher auch in einem internationalen Wissenschaftsturnier antreten können – dem European Union Contest for Young Scientists.

Rund 120 Jugendliche in 79 Teams aus 35 Nationen trafen sich letzten September in Moskau zur diesjährigen Europameisterschaft der Jungforscher. Von Zurückhaltung und Schüchternheit keine Spur: Selbstbewusst stellten die Nachwuchswissenschaftler in den Räumen der gastgebenden Bauman-Universität ihre wissenschaftlichen und technischen Forschungsarbeiten der Jury vor. Dieses 15-köpfige Gremium unter Leitung des Esa-Astronauten Ulf Merbold hatte angesichts der hohen Qualität der Wettbewerbsbeiträge keine leichte Aufgabe vor sich. »Das Fachgebiet oder die Nationalität der Teilnehmer spielt für die Bewertung absolut keine Rolle«, so Merbold. »Entscheidend ist die Cleverness der Teilnehmer: Wie innovativ ist die Fragestellung des durchgeführten Projekts, welche Methode wurde für die Bearbeitung ausgewählt, was ist das Ergebnis und wie wird es präsentiert?«

Hinsichtlich dieser Cleverness standen die Jungforscher ihren bereits etablierten Kollegen in nichts nach – egal, ob sie Alltagsphänomene untersuchten, technische Verfahren verbesserten, theoretische Modelle erstellten oder die Umwelt genauer unter die Lupe nahmen.

Renate Landig (19) und Igor Gotlibovych (18) reichte ein genauer Blick in ein Waschbecken, um zu neuen Erkenntnissen zu gelangen. Die beiden Gymnasiasten aus Bad Saulgau und München erkannten, dass Wasser unter Umständen durchaus seine Ecken und Kanten hat. Ausgangspunkt ihrer Arbeit war eine Beobachtung, die jeder beim morgendlichen Zähneputzen machen kann: Um den Punkt, an dem der Wasserstrahl auf den Beckenboden trifft, bildet sich eine flache, runde Zone aus, in der die Flüssigkeit rasch in radialer Richtung wegströmt. Da sich das Wasser dabei auf eine immer größere Fläche verteilt, nimmt der Druck, den es ausübt, nach außen hin ab. Ist der Druck auf denjenigen der umgebenden Flüssigkeit gesunken, bildet sich eine Stoßfront aus: Das Wasser türmt sich unvermittelt zu einer rund zehnfach dickeren Schicht auf. Dieser hydraulische Sprung ist in der Regel kreisförmig (SdW 10/2002, S. 116).



ALLE ABBILDUNGEN: UWE REICHERT

Igor Gotlibovych (links) und Renate Landig gewannen mit ihrer Arbeit über eckiges Wasser einen ersten Preis.

Nature-Arbeit korrigiert

Unter bestimmten Bedingungen aber wird die radiale Symmetrie gebrochen und der hydraulische Sprung nimmt die Gestalt eines symmetrischen, krummlinig begrenzten Vielecks an – Vierecke sind ebenso anzutreffen wie Sieben- oder Zweiecke.

Welche Bedingungen das sind, untersuchten die beiden künftigen Physikstudenten durch systematische Experimente. Sie variierten Viskosität und Oberflächenspannung der Flüssigkeit sowie Volumenstrom und Fallhöhe des Strahls. Schnell war klar, dass die Ecken immer nur in Verbindung mit Wirbeln auftreten. Indem Landig und Gotlibovych kleine Partikel und Papierschnipsel in die Wirbel einbrachten, stellten sie fest, dass die Flüssigkeit in den Wirbeln sowohl eine Rotations- als auch eine Translationsbewegung vollführt: Die rotierenden Schnipsel wurden wie in einer Rohrleitung in Richtung der nächsten Ecke getrieben. Die theoretische Beschreibung des Phänomens, welche die beiden Jungforscher daraufhin entwarfen, geht über die bisher einzige veröffentlichte Erklärung hinaus und korrigiert diese *(Nature, Bd. 392, S. 767, 23. April 1998)*. Wann zuvor gelang es Gym-

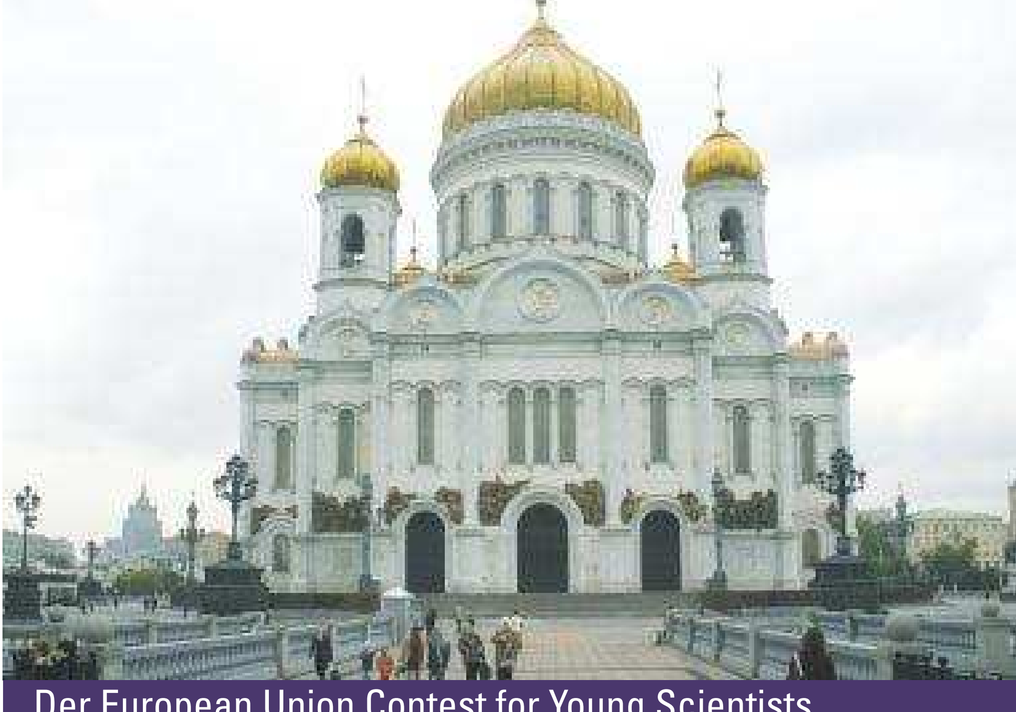
nasiasten, eine Nature-Publikation zu verbessern? Die Jury war davon offenbar so beeindruckt, dass sie der Arbeit einen der mit 5000 Euro dotierten ersten Preise zuerkannte. Zudem gewannen Landig und Gotlibovych einen Ehrenpreis: Sie dürfen im Dezember der Nobelpreis-Verleihung in Stockholm beiwohnen.

Die gleiche Auszeichnung – einen ersten Preis und eine Fahrt nach Stockholm – erhielt Silvana Konermann (17) aus Zürich für eine medizinische Arbeit. Anstoß für ihre Idee gab ein Krankheitsfall in der Familie. Konermanns Großmutter zog sich im Krankenhaus eine Harnwegsentzündung zu – hervorgerufen durch einen Katheter. Das sollte doch eigentlich zu vermeiden sein, dachte sich die Schülerin des Sächsischen Landesgymnasiums St. Afra in Meißen. In der medizinischen Literatur galt das Problem von Harnwegsinfektionen nach dem Legen eines Blasenkatheters indes als ungelöst. Die bisherige Prophylaxe – die orale Einnahme von Antibiotika – erwies sich als wenig wirksam, da sich auf dem Katheter ein Film bildet, der die Bakterien vor dem Wirkstoff schützt. Also machte sich Konermann daran, eine neuartige Prophylaxe durch eine mit Antibiotika beschickte Katheteroberfläche zu entwickeln und in vitro zu untersuchen.

Die Tests mit verschiedenen Trägermaterialien und Antibiotika führte die Schülerin am Paul-Scherrer-Institut Würenlingen (Schweiz) und am Leibniz-Institut für Polymerforschung in Dresden durch. Das Träger-Wirkstoff-System Latex/Tetracyclin sowie eine Kombination der Hydrogele PE oder PVP mit dem Antibiotikum Norfloxacin erwiesen sich als besonders erfolgreich. Diese Systeme geben den Wirkstoff schnell, in hoher Konzentration und kontinuierlich an den Infektionsort ab. Gegenüber der traditionellen oralen Einnahme bietet die von Konermann entwickelte lokale Prophylaxe mehrere Vorteile: Das Antibiotikum wirkt gezielt am Infektionsort, die natürliche Bakterienflora im restlichen Organismus bleibt erhalten, systemische Nebenwirkungen werden reduziert, weil nur wenig von dem Wirkstoff in den Blutkreislauf gelangt, und die Adhäsion von Bakterien an die Katheteroberfläche wird vermindert.

Ein Chemielabor auf einem Chip – mit diesem anspruchsvollen Thema trat Stephen Schulz (19) aus Gelsenkirchen an. Der dreimalige Jugend-forscht-Teilnehmer baute damit auf seinen in den Vorjahren entwickelten Analyse- und Syntheseverfahren auf. Aus selbst geätzten Kupferplatinen konstruierte er elektrochemische Messzellen im Mikromaßstab für die Elektroanalytik. Ferner entwickelte er ein neues Konzept zur einfachen elektrochemischen Synthese von magnesium- und lithiumorganischen Verbindungen, das eine hohe Ausbeute verspricht. Da solche metallorganischen Verbindungen als Wirkstoffe eingesetzt werden, ist das Verfahren für die Pharmaindustrie interessant. Neben einem mit 3000 Euro dotierten zweiten Preis war der Jury diese Entwicklung einen Spezialpreis des Europäischen Patentamts in München wert.

Ebenfalls einen Spezialpreis des Europäischen Patentamts gewann ein Team aus Österreich: Susanne Cernak (16), Felix Faschinger (18) und Marcus Metz (20) stellten ein umweltfreundliches Verfahren für die Herstellung von Wasserstoff vor. Während gängige Produktionsmethoden Öl, Erdgas oder Strom als Energiequelle benötigen, nutzen die drei Schüler der Höheren Technischen Lehr- ▷

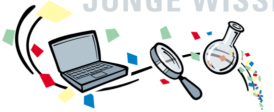


Der European Union Contest for Young Scientists

»Jugend forscht international«, so könnte man den European Union Contest for Young Scientists treffend beschreiben. Die Europäische Union unterstützt den Wettbewerb, um die Kooperation und den Austausch zwischen den Nachwuchswissenschaftlern zu fördern. Deshalb geht es nicht nur um das Gewinnen von Preisen. Den Jungforschern soll ein Forum geboten werden, das ihre Begeisterung an wissenschaftlichen Fragestellungen weiter stärkt, und das sie über Kulturgrenzen hinweg mit Gleichgesinnten zusammenbringt.

Zu den Teilnahmebedingungen gehört, dass die Forschungsarbeiten bereits im jeweiligen Heimatland ausgezeichnet worden sein müssen. Nur die nationalen Organisatoren können Vorschläge einreichen. Der hohen Qualität der Teilnehmerbeiträge wegen werden jeweils drei erste, zweite und dritte Preise sowie eine Reihe von Sonderpreisen vergeben. Zur Zeit des Wettbewerbs müssen die Teilnehmer älter als 14, aber jünger als 21 Jahre sein. Die Teilnahme ist im Übrigen nicht auf Jungforscher aus EU-Mitgliedsländern beschränkt.

Sogar der Austragungsort muss nicht in der Europäischen Union liegen. Der erste EU Contest for Young Scientists fand 1989 in Brüssel statt. Folgestationen waren Kopenhagen, Zürich, Sevilla, Berlin, Luxemburg, Newcastle upon Tyne, Helsinki, Mailand, Porto, Thessaloniki, Amsterdam, Bergen, Wien, Budapest und Dublin, bevor der 17. Wettbewerb nun im September dieses Jahres in Moskau ausgerichtet wurde. Als Gastgeber und lokaler Organisator fungierte die Bauman-Universität in der russischen Hauptstadt, die während des Wettbewerbs ihr 175-jähriges Bestehen feierte. Die Preisverleihung erfolgte im Konferenzsaal der im Jahr 2000 wieder aufgebauten Erlöserkirche (Bild). Im kommenden Jahr wird der Wettbewerb in Stockholm stattfinden.





Konstruierten eine Anlage, in der Bakterien Wasserstoff als Energieträger herstellen: Marcus Metz, Felix Faschinger und Susanne Cernak (von rechts). Dafür gab es einen Sonderpreis des Europäischen Patentamts München.

anstalt in Braunau spezielle Wasserstoff produzierende Bakterien, die sie in der Umgebung ihres Wohnorts ausfindig gemacht hatten. Ein selbst konstruiertes Reaktionsgefäß sorgt für die richtigen Bedingungen, um die Ausbeute an Wasserstoff zu maximieren. Gibt es bald Kraftfahrzeuge mit Wasserstoffantrieb, die nicht den berühmten Tiger, sondern Bakterien im Tank haben?

Eins steht jedenfalls fest: Ein genauer Blick in die natürliche Umgebung kann sich lohnen. Während das österreichische Team Rohstoff liefernde Mikroorganismen entdeckte, fanden Teilnehmer aus Spanien heraus, dass eine bestimmte Pflanze auf Gran Canaria noch nicht beschrieben war: *Sonchus leptacaulis* ist offenbar eine neue Pflanzenart, die kürzlich auf der spanischen Insel heimisch geworden ist. Für diese Studie erhielten Javier López Martínez-Fortún, Eliecer Pérez Robaina und Carlos Machado Carvajal (alle 18) einen ersten Preis.

Man braucht allerdings nicht auf entlegene Inseln zu gehen, um in Fauna und Flora fündig zu werden. Das jüngste Team im Wettbewerb, Eric Dele (15) und Pierre Haas (16) aus Luxemburg, schaute sich im Süden des Großherzogtums um und untersuchte die Verbreitung von Gallen, kugeligen Gewebewucherungen an Pflanzen, die durch Ausscheidungen von Fremdorganismen hervorgerufen werden. Unter mehreren Gallen verursachenden Insekten konnten die beiden Jungforscher erstmals die Johannisbeer-Blasenlaus *(Cryptomyzus ribis)* in Luxemburg nachweisen. Eine andere von ihnen entdeckte Art, *Neuroterus fumipennis*, war erstmals vor 95 Jahren in Luxemburg beschrieben, danach aber nicht mehr beobachtet worden. Für diese Pionierarbeit erhielten die beiden Teenager einen der mit 1500 Euro dotierten dritten Preise.

Sterne, Bauchreden und Windkanäle

Agata Karska (20) aus Polen richtete ihren Blick ebenfalls in die Natur, aber nicht nach unten, sondern in den Nachthimmel. Zwei Jahre lang fuhr sie fast jedes Wochenende zur 60 Kilometer von ihrem Heimatort entfernten Sternwarte der Nicolaus-Copernicus-Universität in Piwnice, um sich an der Suche nach Veränderlichen Sternen zu beteiligen. Während der Datenanalyse entdeckte sie mehrere kurzperiodische Veränderliche. Einer von ihnen, BD+14°5016, zeigte eine auffällig asymmetrische Lichtkurve. Die Jungastronomin erkannte, dass es sich hier um ein enges Doppelsternsystem handelt, wobei sich die beiden verschieden großen Komponenten von der Erde aus gesehen wechselseitig verdecken. Und mehr noch: Ein Detail in der Lichtkurve wies auf eine zusätzliche Energiequelle auf der Oberfläche des größeren Sterns hin. Dieser so genannte Hot Spot schien seine Lage im Verlauf eines Jahres beizubehalten, doch seine Helligkeit variierte. Aus Modellrechnungen schloss Karska: Die beiden Komponenten umkreisen sich auf solch engen Bahnen, dass sie sich zeitweise berühren und dabei Masse austauschen. Diese Erkenntnis war der Jury den von der Esa gestifteten Sonderpreis wert.

Die Vielfalt der behandelten Themen kannte wahrlich keine Grenzen. Patrick Collison (17) aus Irland stellte die neue Programmiersprache Croma vor, mit der sich im World Wide Web laufende Programme leichter und preiswerter entwickeln lassen. Zdeněk Janovský (19) aus Tschechien nahm sich gefährdeter Pflanzenarten an und schlug Strategien zur Erhaltung der Biodiversität vor. Margus Niitsoo (18) aus Estland analysierte Verallgemeinerungen der Fibonacci-Folge und Gitte Ahlquist Jonsson (19) aus Dänemark konstruierte Hilfsmittel für Körperbehinderte zum An- und Ausziehen von Strümpfen. Für ihre innovativen Arbeiten durften die Jugendlichen jeweils einen der zweiten beziehungsweise dritten Preise entgegennehmen.

Doch auch die nicht mit einer Auszeichnung geehrten Projekte konnten sich sehen lassen. Mit ihrer physikalischen Analyse des Bauchredens betraten Jörg Metzner (19) aus Bad Homburg und Marcel Schmittfull (17) aus Schweinfurt Neuland. Die letzte wissenschaftliche Untersuchung dieser Art stammt aus den 1920er Jahren, wobei damals nur von Belang war, dass das Bauchreden unabhängig vom Bauch erfolgt. Die beiden Gymnasiasten simulierten die Schallausbreitung in Mund und Gaumen und erstellten ein Modell zur Beschreibung der Ersatzlaute, die ein Bauchredner mit raffinierten Zungenstellungen erzeugen muss, damit er Laute wie »p« und »m« auch ohne geschlossene Lippen aussprechen kann.

Mit einem selbst gebauten Windkanal beeindruckte Kristaps Dambis (18) aus Lettland. Darin untersucht er die aerodynamischen Eigenschaften von Rennwagen. Doch seine praktische Erfahrung reicht noch weiter: Als Hobby fährt der Schüler aus Riga bereits seit fünf Jahren Rennen mit einem Smart Roadster. Manche Jungforscher kennen wirklich keine Grenzen. ◁

AUTOR



Uwe Reichert ist promovierter Physiker und Redakteur bei Spektrum der Wissenschaft.

Pendelverkehr durch die Erde

Ein Tunnel in gerader Linie durch das Innere der Erdkugel wäre nicht nur viel kürzer als die Luftlinie; die Erde selbst wäre auch beim Antrieb der Tunnelbahn behilflich.

Von Norbert Treitz

Warum soll man für die Reise von Europa nach Australien das Flugzeug wählen? Die kürzeste Verbindung zwischen zwei Punkten auf einer Kugel, die einander fast gegenüberliegen, verläuft nicht an der Oberfläche, sondern mitten durch die Kugel hindurch. Der Unterschied macht im Extremfall – bei genau gegenüberliegenden Punkten – reichlich ein Drittel der Wegstrecke aus! Viel wichtiger noch: Man müsste sich um Antrieb und Bremsung nicht kümmern; das erledigt die Schwerkraft der Erde automatisch.

Bohren wir also vom Abfahrts- bis zum Zielpunkt einen geradlinigen Tunnel, also entlang einer Kugelsehne, durch die Erdkugel. Sehen wir großzügig hinweg über die technischen Schwierigkeiten, die ein Loch von mehreren tausend Kilometern Länge selbst dann bereiten würde, wenn nicht bei der Temperatur im Erdinneren jede Stützkonstruktion alsbald zerschmölze. Unterstellen wir als echte Theoretiker lieber, diese Stützkonstruktion sei so massiv, dass sie das für den Tunnelbau ausgeräumte Material gerade aufwiegt. Nach dem Tunnelbau ist also das Schwerefeld der Erde genauso wie zuvor.

Lassen wir auf Magnetschienen reibungsfrei Züge von einem Ende zum anderen fahren. Auf dieser echten Langstrecke könnte der Transrapid seine Vorzüge voll ausspielen! Die Schwerkraft der Erde beschleunigt den Zug auf der ersten Hälfte der Reise und bremst ihn auf der zweiten Hälfte in gleichem Maße wieder ab, sodass er präzis im Zielbahnhof zum Stehen kommt. Bei einem Tunnel, der genau durch den Erdmittelpunkt verläuft, sind sogar die Schienen entbehrlich, denn die Kraft wirkt stets in Fahrtrichtung oder genau entgegengesetzt dazu.

Ein solcher Tunnel würde allerdings von den meisten Ländern der Erde aus auf Wasser treffen (Bild rechts). Ein Teil der Neuseeländer hat einen Teil der Spanier und Portugiesen als Antipoden (»Gegenfüßler«), der Rest Europas schaut von unten »auf« die Südsee. Es gibt sogar in dieser Südsee die (unbewohnte) Inselgruppe »Antipodes Islands«, deren Namensgeber offenbar aus der Nähe des Ärmelkanals stammten.

Schussfahrt ins Erdinnere

Die Bahnhöfe sollen waagerechte Haltebahnsteige haben. Von ihnen aus geht es mehr oder weniger steil abwärts auf die innerirdischen Sehnenstrecken. Zum Start wird der Zug einfach vom waagerechten Bereich in den abschüssigen geschoben, und es beginnt eine Schussfahrt wie bei der Achterbahn oder beim Skifahren. Die Geschwindigkeit nimmt bis zur Mitte der Sehne zu und dann wieder ab; am Ziel angekommen, schwenkt der Zug mit vernachlässigbarer Geschwindigkeit von unten in einen waagerechten Bahnsteig des Zielbahnhofs.

Wie fühlt sich so eine Zugfahrt an? Wir verbringen fast das ganze Leben so, dass uns elastische Kräfte von Sitzmöbeln oder Fußböden am freien Fall hindern; folglich empfinden wir diesen Zustand als normal und den freien Fall als bedrohlich oder zumindest als Nervenkitzel, obwohl das Ungewohnte gerade das Ausbleiben des tatsächlichen Kitzelns der Nerven ist. Eine Fahrt durch den Mittelpunkt des Planeten erlebt man als freien Fall – auch den zweiten, vorwärts aufsteigenden Teil! – und nennt das Schwerelosigkeit, in Umkehrung der wahren Tatsachen (siehe auch Spektrum der Wissenschaft 7/2005, S. 106).

Der Durchgang durch den tiefsten Punkt der Strecke – sei es der Erdmittelpunkt oder auch nicht – ist für die Insassen nicht bemerkbar. Was oben und unten, innen und außen ist, kann man nicht spüren. Vor der Abfahrt setzt man sich, wie in einem gewöhnlichen Zug,



SIGANIM / SPEKTRUM DER WISSENSCHAFT

Arbeiten in Europa, Feiern in Australien: Der Pendelverkehr durch den langen Tunnel macht's möglich, mit minimalem Aufwand an Energie und bescheidenen 42 Minuten pro Fahrt.

auf eine Sitzbank, auch wenn diese bei einer Erdmittelpunktsstrecke eigentlich entbehrlich ist. Das Zugpersonal vergewissert sich, dass alle Passagiere ihre Hosenträgergurte angelegt haben und das Gepäck sicher verstaut ist. Bei der Abfahrt neigt sich der Zug steil nach vorne unten, etwa so wie am Ende des Aufzugs einer Achterbahn. Man fällt dann dauernd nach vorne; dabei öffnen sich automatisch vor den Sitzen die großzügig dimensionierten Spucktüten. Am Ziel kippt man wieder nach vorne unten und sitzt – überraschenderweise? – in Ruhe im Zielbahnhof, jetzt wieder mit normaler Schwereempfindung. So könnte man an dieser Stelle auch sitzen, wenn man die Reise auf einem Halbkreis um die Erde beliebig langsam gemacht hätte.

Die Wahrheit über den Schwerpunkt

Eigentlich klingt die Geschichte, von der Möglichkeit des Tunnelbaus selbst abgesehen, nicht allzu abwegig. Schließlich haben wir in der Schule gelernt, dass man getrost unterstellen darf, die Gravitationskraft, die auf einen ausgedehnten Körper wirkt, greife nur in einem speziellen Punkt desselben an, dem Schwerpunkt. Ebenso könne man die Kraft, die ein ausgedehnter Körper wie die Erde ausübt, ersetzen durch die Kraft eines Punkts mit der Masse der Erde, der in deren Schwerpunkt lokalisiert ist. Da der Schwerpunkt und der geometrische Mittelpunkt der Erde praktisch zusammenfallen, muss man sich nicht wundern, wenn unsere Züge auch im Inneren der Erde die auf deren Mittelpunkt gerichtete Erdbeschleunigung erfahren.

Das trifft zwar zu; aber dummerweise ist diese Schulweisheit im Allgemeinen falsch. Im Labor, innerhalb dessen man getrost das Schwerefeld der Erde als homogen annehmen kann, ist sie richtig. Aber sie versagt bereits im Inneren der Erde, wie im Folgenden ausgeführt werden soll.

Für unseren fantastischen Zugverkehr müssen wir also etwas genauer hinschauen. Eine wenig gebräuchliche, aber sehr aufschlussreiche Formulierung des Gravitationsgesetzes (Kasten S. 104) verhilft uns zu zwei wesentlichen Einsichten über das Schwerefeld isotroper Masseverteilungen, das sind Kugeln, deren Massendichte nur vom Abstand zum Mittelpunkt abhängt und von nichts sonst. Erstens ist für solche Kugeln die voreilige Schulweisheit vom Schwerpunkt exakt gültig: Ihr Schwerefeld – wohlgemerkt: im Außenraum – ist dasselbe wie das eines Punkts gleicher Masse im Kugelmittelpunkt. Zweitens ist das Schwerefeld einer isotropen Hohlkugel in deren Innerem überall gleich null. Auf unsere U-Bahn wirkt also an jedem Punkt ihres Wegs nur der Teil der Erde, der dem Mittelpunkt noch näher ist als die Bahn selbst. Der ganze Rest der Erde ist nämlich nichts weiter als eine – schwerefeldmäßig wirkungslose – Hohlkugel.

Für das Folgende unterstellen wir der Einfachheit zuliebe, die Massenverteilung innerhalb der Erde sei nicht nur isotrop – was mit großer Genauigkeit zutrifft –, sondern sogar homogen. Die Erde habe also nicht etwa, wie in Wirklichkeit, einen schweren Kern und einen leichten Mantel, sondern überall die gleiche Dichte, nämlich die mittlere Dichte der echten Erde von etwa 5,5 Gramm pro Kubikzentimeter.

Wenn also die Bahn die Entfernung r vom Erdmittelpunkt hat, dann wird der Wagon de facto nur noch von der inneren Teilkugel mit dem Radius r angezogen. Deren Masse ist proportional ihrem Volumen von $4\pi r^3/3$; daraus folgt, dass die Beschleunigung g gleich $-Dr$ ist, mit der zur Dichte d proportionalen Konstanten $D = 4\pi dG/3$. Für eine Probemasse m im Inneren der Kugel bekommen wir also die zur Mitte gerichtete Schwerkraft $mg = -rDm$. Das ist wie bei der ganz gewöhnlichen Hooke'schen Schraubenfeder, dem beliebten harmonischen Oszillator des Physikunterrichts: Die auf den Gleichgewichtspunkt zutreibende Kraft ist proportional der Entfernung von diesem Gleichgewichtspunkt.

Wandern wir radial vom Mittelpunkt nach außen, so bekommen wir als Potenzial $U = Dr^2/2 = D(x^2+y^2+z^2)/2$. (Die potenzielle Energie eines Wanderers in diesem Potenzial ist gleich seiner Masse mal dem Wert des Potenzials in diesem Punkt – wobei die übliche Auffassung, nach welcher der Wanderer »seine« potenzielle Energie für sein Eigentum hält, nicht unproblematisch ist.) Für den Mittelpunkt S ist $U = 0$, was nichts weiter ist als eine willkürliche Festlegung. Die Formel gilt für den ganzen Innenraum, sie liefert für $r = R$, also die Oberfläche, das Potenzial $U = DR^2/2$ und die Feldstärke = Fallbeschleunigung $g = -DR$. Im Außenraum gilt $U = 3/2\, DR^2 - DR^3/r$. Für die homogene Kugel liegen also ein Drittel der Potenzialdifferenz zwischen unendlicher Ferne und Mittelpunkt im Inneren und zwei Drittel außen. Wenn Sie mit einer geeigneten (nach unten verlängerten Jakobs-)Leiter vom Mittelpunkt aus unendlich weit entkommen wollen und bereits bis zur Oberfläche aufgestiegen sind, haben Sie beim homogenen Planeten genau ein Drittel der Arbeit getan (Bild S. 105).



Diese Überlagerung zweier flächentreuer Erdkarten zeigt rot die Gebiete an, in denen Antipoden einander mit trockenen Füßen gegenüberstehen können. Hellblau: beiderseits Wasser, grün und orange: Wasser gegen Land.

Für eine Sehne in x-Richtung mit $z = 0$ und einem konstanten y ist $U = D(x^2+y^2)/2$, die Komponenten der Beschleunigung finden wir durch Ableiten: $g_x = -Dx$, $g_y = -Dy$ (konstant) und $g_z = 0$. Also drückt auf der ganzen Sehne eine konstante Schwerekomponente genau quer zur Schiene, und die Schwerebeschleunigung parallel zur Schiene ist der Entfernung vom Mittelpunkt der Schiene proportional und entgegengerichtet.

Der zugehörige Faktor D ist bemerkenswerterweise nicht von den anderen Koordinaten abhängig. Ein frei auf der Schiene rollender (oder gleitender) Wagon pendelt also wie ein harmonisches Federpendel um den Mittelpunkt seiner Schiene mit der Kreisfrequenz $\sqrt{D}$, denn die Masse des Wagons kürzt sich heraus. Ob der Wagon dabei zwischen den Enden der Sehne pendelt oder nur etwas um ihren Mittelpunkt herum, und ob die Sehne nur ganz kurz zwei Nachbar- ▷

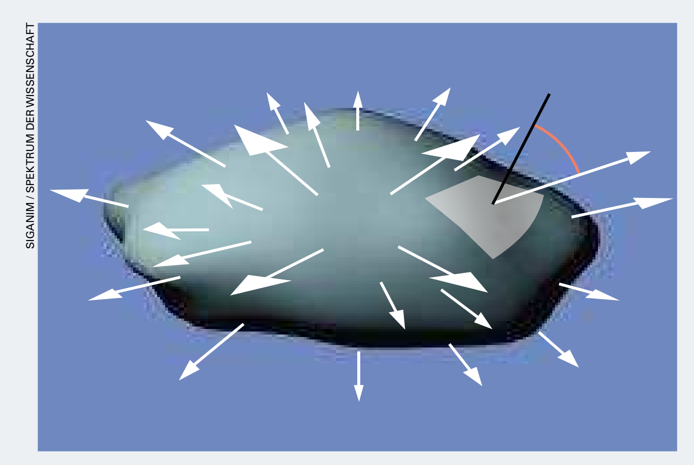
Das Gravitationsgesetz in ungewohnter Form

Bei der gegenseitigen Anziehung zweier Massen fließt zwar nichts Materielles von der einen Masse zur anderen; aber es ist hilfreich, so zu tun, als sei das der Fall! Der mathematische Formalismus ist nämlich derselbe wie bei echten Strömungen.

Jeder Massenpunkt sei Quelle eines gewissen Etwas, das ihm nach allen Seiten gleichmäßig entströmt. (Bei elektrischen Ladungen gibt es sogar »Quellen« und »Senken«, und man pflegt die Wege des elektrischen Etwas als Feldlinien bildlich darzustellen.) Für einen Beobachter an irgendeinem Punkt des Raums macht sich dieses Etwas als eine Beschleunigung bemerkbar, die genau entgegen der gedachten Strömungsrichtung wirkt, oder eben als eine Kraft, was bis auf den Proportionalitätsfaktor Masse dasselbe ist. Mit zunehmender Entfernung von der Quelle verdünnt sich das Etwas immer mehr; es hat nämlich keine andere Quelle als die Massen, und es gibt keine Senken, also kann unterwegs weder Etwas verschwinden noch Etwas hinzukommen.

Diese »Kontinuitätsbedingung für Etwas« drückt man wie folgt aus: Man umgibt alle Quellen (das heißt alle Massen, seien sie punktförmig oder ausgedehnt), die einen interessieren, mit einer irgendwie geformten, geschlossenen Hülle, sagen wir einem Kartoffelsack oder Luftballon; die Hülle muss nicht eng anliegen. Dann ist die Gesamtmenge an Etwas, welche die Hülle durchströmt, proportional der Gesamtmasse der von der Hülle umschlossenen Quellen. (Wie man die durchströmende Gesamtmenge berechnet, ist im Bild unten erläutert; Fachleute erkennen in dieser Formulierung den Gauß'schen Integralsatz.)

Das scheint zunächst fast selbstverständlich: Jede Quelle erzeugt Etwas proportional ihrer Masse, und irgendwie muss das ganze Etwas ja aus der Hülle herausfließen. Erst auf den zweiten Blick zeigen sich die überraschenden Konsequenzen: Wenn man innerhalb der Hülle die Massen irgendwie umräumt, ändern sich zwar die Kräfte an den einzelnen Punkten der Hülle, aber nicht das Integral (eine Art Gesamtsumme) des Skalarprodukts aus Kraft und Flächennormale über die ganze Hülle. Das Gleiche gilt, wenn man die Hülle aufbläst oder verkleinert, solange sie dieselben Massen umschließt wie zuvor. Außerdem wirken sich außerhalb der Hülle gelegene Massen nicht auf das Integral aus, denn das von ihnen erzeugte Etwas ist im Wortsinn ein »durchlaufender Posten«.



Der Fluss an Etwas durch ein kleines Stück Hülle ist proportional der an diesem Punkt herrschenden Beschleunigung, aber nur zu deren Anteil senkrecht zur Fläche (Skalarprodukt von Strömungsvektor und Flächennormale).

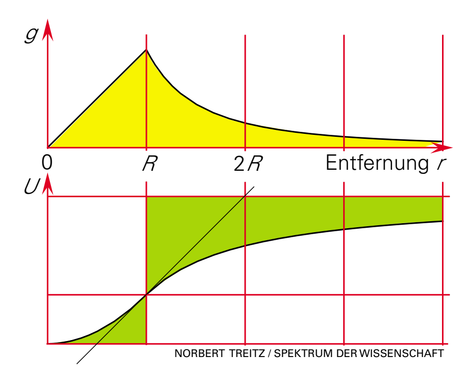
Die genannte Formulierung des Gravitationsgesetzes ist sehr indirekt: Sie gibt nicht Auskunft über die Kraft in einem Punkt, sondern nur über deren Integral über eine ganze Fläche. Es ist, als würde eine Horde Ameisen über die Oberfläche krabbeln und in jedem Punkt den Fluss von Etwas nach Betrag und Richtung messen. Dann addieren sie ihre Messergebnisse zu einem Gesamtfluss durch die Hülle auf, können aber von diesem einen Zahlenwert nicht auf den Fluss in jedem Punkt der Hülle zurückschließen.

Es sei denn, die Hülle wäre kugelförmig und die Massenverteilung in ihrem Inneren um den Kugelmittelpunkt radialsymmetrisch. Dann strömt aus jedem Punkt der Hülle die gleiche Menge Etwas in bekannter Richtung, nämlich genau auswärts; entsprechend ist auch die Beschleunigung an jedem Punkt der Kugeloberfläche betragsmäßig die gleiche und zum Mittelpunkt gerichtet. Aus dem Integral über eine konstante Funktion kann man den Wert dieser Funktion in jedem Punkt errechnen.

Wenn zum Beispiel nur ein Massenpunkt im Mittelpunkt der Kugel sitzt, dann ist der Gesamtfluss an Etwas gleich der Kraft in einem Punkt der Hülle mal der Kugeloberfläche $4\pi r^2$. Oder, indem man durch r^2 dividiert: Die Schwerebeschleunigung, die ein Massenpunkt ausübt, ist auf diesen zu gerichtet, proportional seiner Masse und umgekehrt proportional dem Quadrat des Abstands, so wie es Isaac Newton ausgedrückt hat. Die Proportionalitätskonstante ist, bis auf einen lästigen Faktor 4π, nichts anderes als die Gravitationskonstante G, und die Abnahme mit dem Quadrat des Abstands erscheint als zwangsläufige Konsequenz der Tatsache, dass der Raum drei Dimensionen hat.

Nehmen wir statt des einen Massenpunkts in der Mitte eine ausgedehnte, isotrope Kugel, das heißt, die Massendichte darf zwar variieren, aber nur in Abhängigkeit vom Radius. Dann bleibt die gesamte Anordnung kugelsymmetrisch; wie oben dürfen wir von dem Integral über die Oberfläche auf den (überall gleichen) Betrag g der Beschleunigung in jedem Punkt der Oberfläche schließen und erhalten das Ergebnis $g=MG/r^2$. Dabei ist M die gesamte von der Kugel mit Radius r eingeschlossene Masse, unabhängig von ihrer radialen Schichtung. Für einen kugelrunden und isotrop gefüllten Planeten kann man also g im Außenraum berechnen, ohne zu wissen, wie die Masse M innen geschichtet ist, wenn sie nur richtungsunabhängig verteilt ist. Das gilt exakt bis herab auf die Oberfläche, also keineswegs nur näherungsweise für große Entfernungen – der andere Ausnahmefall, in dem es erlaubt ist, sich die ganze Masse eines Planeten im Schwerpunkt konzentriert vorzustellen.

Was ist, wenn in einer kugelsymmetrischen Anordnung überhaupt keine Masse steckt, wenn also eine leere Seifenblase im Inneren einer konzentrischen, massebehafteten Hohlkugel liegt? Dann ist das Flussintegral null, und aus denselben Gründen wie oben hat die Beschleunigung überall den Wert null. So gelangen wir hinterrücks zu der Erkenntnis, dass das Schwerefeld im Inneren einer isotropen Hohlkugel überall gleich null ist.



Die Fallbeschleunigung *g* und das Potenzial *U* (mit drei Nullpunkten zur Auswahl) für die homogene Kugel sind innen andere Funktionen der Entfernung als außen.

städte verbindet oder diametral die Kugel durchquert, ändert nichts am Betrag dieser Kreisfrequenz.

Wir können daher ein Verkehrsnetz aus kurzen und langen Sehnen mit der nur von der Massendichte abhängenden Periode $T = 2\pi\sqrt{1/D} = 2\pi\sqrt{3/(4\pi G d)}$ installieren. Für T ergibt sich der Wert 84 Minuten; eine halbe Schwingung, das heißt der Weg von A nach B auf der Erdoberfläche, ist also in 42 Minuten zurückgelegt. Diese Zeit ist für alle Sehnenstrecken dieselbe; sie würde sogar unverändert bleiben, wenn die Erde bei gleicher Massendichte größer oder kleiner wäre.

Die Geschwindigkeit ist allerdings umso größer, je steiler der Tunnel sich in die Erde bohrt. Im Extremfall der Erdmittelpunktsbahn erreicht sie in der Streckenmitte 7,9 Kilometer pro Sekunde.

Der Fahrplan für ein globales Netz aus verschieden langen Sehnen kann ausgesprochen starr sein: Zu jeder vollen Stunde fährt von jedem Bahnhof ein Zug zu jedem Ziel, und alle kommen 42 Minuten später an, selbst der durch den Mittelpunkt des Planeten. Man hat dann 18 Minuten Zeit zum eventuellen Umsteigen und bekommt seinen Anschluss, wenn jede Strecke doppelgleisig ist, das heißt zwei Tunnelröhren mit je einem Pendelzug hat. Das Wort »Pendelzug« ist hier ausgesprochen wörtlich zu verstehen, wenn man die Bewegung mit einem Federpendel vergleicht.

Das Fahren auf kurzen Sehnen unterscheidet sich fast gar nicht vom Sitzen auf den Bahnsteig. Auf einer Sehne, die dem Mittelpunkt des Planeten bis zu p Prozent des Radius nahe kommt, spürt man stets p Prozent der üblichen Schwerkraft, denn die Schienen müssen diese p Prozent aushalten und drücken entsprechend vom Boden des Fahrzeugs gegen den Passagier, und zwar über den ganzen Weg konstant und dauernd genau rechtwinklig zur Schiene nach »oben«. Man merkt also auch auf einer solchen Reise nicht, wann man von der ersten Hälfte zur zweiten wechselt.

Wenn Sie also nach Australien fahren wollen und 42 Minuten (fast) freien Fall scheuen, teilen Sie die Fahrt in mehrere Etappen mit oberflächennäheren Sehnen und Stippvisiten beim Tageslicht auf. Es dauert dann allerdings so viele Stunden länger, wie Sie Etappen hinzufügen.

Im nächsten Heft will ich Ihnen weitere Besonderheiten des innerirdischen Verkehrs nahebringen. Zur Vorbereitung empfehle ich, über folgende Aufgabe nachzudenken: Wie stellt man ein exakt homogenes Gravitationsfeld her? Wohlgemerkt: nicht nur angenähert homogen wie das Schwerefeld der Erde am Boden über kleine Entfernungen.

Die üblichen Tricks der theoretischen Physiker sind nicht erlaubt: Die Massenverteilung, die das homogene Schwerefeld erzeugen soll, darf nicht unendlich ausgedehnt sein. Andererseits wollen wir von unserem Gerät nicht verlangen, dass es auch noch die Einflüsse ferner Massen kompensiert. Nur das von ihm selbst erzeugte Feld muss homogen sein. Vielleicht können die im Kasten genannten Sätze über das Potenzial isotroper Kugeln als Anregung dienen. ◁

AUTOR UND LITERATURHINWEISE



Norbert Treitz ist apl. Professor für Didaktik der Physik an der Universität Duisburg-Essen. Seine Vorliebe für erstaunliche und möglichst freihändige Versuche und Basteleien sowie für anschauliche Erklärungen dazu nutzt er nicht nur für die Ausbildung von Physiklehrkräften, sondern auch zur Förderung hoch begabter Kinder und Jugendlicher.

Nüsse und Rosinen. Von Norbert Treitz. CD mit Buch, in Vorbereitung bei Harri Deutsch, Frankfurt am Main

Brücke zur Physik. Von Norbert Treitz. Harri Deutsch, Frankfurt am Main 2003

Theoretische Physik 1 (Mechanik I). Von Walter Greiner. Harri Deutsch, Frankfurt am Main 1981; darin Aufgabe 27.4

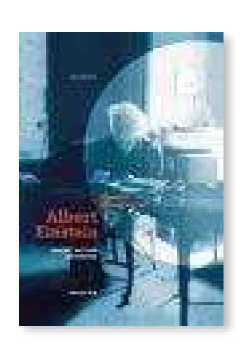
VERMISCHTES

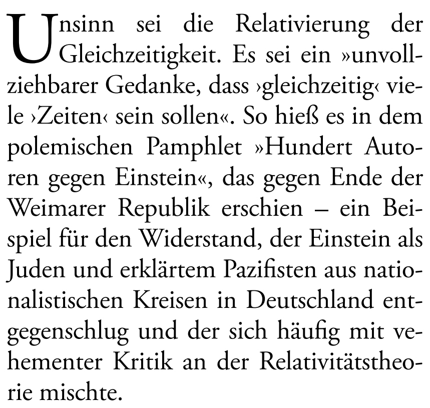
Jürgen Renn (Hg.)

Albert Einstein – Ingenieur des Universums

Hundert Autoren für Einstein

Wiley-VCH, Weinheim 2005. 472 Seiten, € 29,90





Unsinn sei die Relativierung der Gleichzeitigkeit. Es sei ein »unvollziehbarer Gedanke, dass ›gleichzeitig‹ viele ›Zeiten‹ sein sollen«. So hieß es in dem polemischen Pamphlet »Hundert Autoren gegen Einstein«, das gegen Ende der Weimarer Republik erschien – ein Beispiel für den Widerstand, der Einstein als Juden und erklärtem Pazifisten aus nationalistischen Kreisen in Deutschland entgegenschlug und der sich häufig mit vehementer Kritik an der Relativitätstheorie mischte.

Auch heute noch können uns relativistische Effekte wie das Zwillingsparadoxon abenteuerlich erscheinen: Es will einem nicht in den Kopf gehen, dass ein Raumfahrer im flotten Raumschiff langsamer altert als sein Bruder zu Hause. Gleichwohl ist die Relativitätstheorie unter Physikern seit Langem etabliert und zum unverzichtbaren Fundament der Kosmologie und Elementarteilchenphysik geworden.

Genau hundert Jahre nach Einsteins ersten bahnbrechenden Artikeln stellen sich »Hundert Autoren für Einstein« bewusst gegen die »Hundert Autoren gegen Einstein«. Das Buch erscheint als Begleitband zur Berliner Ausstellung »Albert Einstein – Ingenieur des Universums«. Was den Essayband von herkömmlichen Biografien unterscheidet, ist die enorme Vielfalt der Blickwinkel und die beeindruckende Fülle des Materials.

In seiner Gliederung folgt das Buch der Dreiteilung der Ausstellung. Die wissenschaftsgeschichtlichen Beiträge im einführenden Teil »Weltbild und Erkenntnis« behandeln die Vereinigung physikalischer Theorien vor Einstein und die offenen physikalischen Fragen seiner Zeit. Der Hauptteil »Einstein – der Lebensweg« behandelt hauptsächlich die Biografie des Jahrhundertgenies, seine Wohnorte und Reisen, persönliche Beziehungen und das Verhältnis zu wissenschaftlichen und kulturellen Geistesgrößen seiner Zeit. Daneben geht es um seine wissenschaftlichen Arbeiten und deren schrittweise experimentelle Bestätigung. Im Schlussteil »Einsteins Welt heute« wird das Ganze abgerundet durch Beiträge zur aktuellen physikalischen Forschung und zur Rezeption von Einsteins Werk.

Die Allgemeine Relativitätstheorie, Einsteins geometrische Theorie der Gravitation, bildet das Fundament der heutigen Kosmologie. Am Anfang ihrer Erfolgsstory stand die verblüffende Vorhersage Einsteins, dass das Schwerkraftfeld der Sonne Lichtrahlen von ihrer geraden Bahn ablenkt. Gerhard Hartls Beitrag über die Bestätigung dieser Vorhersage liest sich wie ein Krimi: Während einer Sonnenfinsternis mussten Sterne in unmittelbarer Nähe der verdeckten Sonnenscheibe auf Fotoplatten gebannt werden. Eine deutsche Expedition zur Beobachtung der Sonnenfinsternis 1914 in Russland scheiterte am Ausbruch des Ersten Weltkriegs. (Einstein: »Mein guter Astronom Freundlich wird in Russland statt der Sonnenfinsternis die Kriegsgefangenschaft erleben.«) Als es englischen Expeditionen 1919 unter großen Schwierigkeiten gelang, Einsteins Vorhersage zu bestätigen, wurde der Physiker in kurzer Zeit weltberühmt.

Dieser erste Durchbruch hatte ein interessantes Nachspiel, wie der folgende Beitrag von Hans Wilderotter beschreibt. Dass ausgerechnet eine englische Expedition die sensationelle erste Bestätigung der Allgemeinen Relativitätstheorie geliefert hatte, wollte man in Deutschland nicht auf sich sitzen lassen. Ein Observatorium sollte gebaut werden, um eine zweite Vorhersage Einsteins, die so genannte Gravitationsrotverschiebung, zu überprüfen und so »wenigstens einer deutschen Sternwarte die Prüfung der Theorie in unmittelbarer Zusammenarbeit mit ihrem Schöpfer möglich zu machen«. Eine überaus erfolgreiche Spendensammlung lief an, und ab 1920 wur-





Links der vierzehnjährige Albert Einstein mit seiner älteren Schwester Maja; rechts Einstein mit seiner zweiten Ehefrau Elsa und Stieftochter Margot

de der Turm von Erich Mendelssohn (1887–1953) erbaut und nach Einstein benannt.

Angesichts ihrer Erfolge sollte man meinen, die Relativitätstheorie hätte sich, einmal bestätigt, mit Leichtigkeit verbreitet. Doch dem standen auch erhebliche Widerstände – nicht nur wissenschaftlicher Natur – entgegen. Dies zeigt zum Beispiel Christian Sichau in »Das allmähliche Verschwinden von Einstein: die Experimente von Georg Joos zur Relativitätstheorie«. Nachdem 1926 der amerikanische Physiker Dayton C. Miller (1866–1941) die Konstanz der Lichtgeschwindigkeit im Experiment nachgeprüft und verletzt gefunden hatte, konnte zwar wenige Jahre später der deutsche Physiker Georg Joos (1894–1959) Millers Ergebnisse mit einem beeindruckenden Versuchsaufbau und noch genaueren Ergebnissen widerlegen und damit die Relativitätstheorie stützen.

Als er aber 1930 seine Ergebnisse veröffentlichte, erwähnte er weder die Relativitätstheorie noch ihren Urheber. Auch später im Deutschen Museum wurde Joos' Apparatur lediglich als »hervorragendes Meisterwerk neuzeitlicher Präzisionsmechanik und -optik« bezeichnet und bis 1956 im Museumsführer nicht mit der Relativitätstheorie in Verbindung gebracht. Schon länger war nämlich Einstein von Nationalisten und Antisemiten angefeindet und bedroht worden, und bereits 1925 hatte Georg Joos in einem Brief an seinen Fachkollegen Arnold Sommerfeld geschrieben: »Unter Nichtphysikern hier gilt nämlich die Relativitätstheorie als staatsgefährdend.«

Eine interessante Themenkombination findet sich im Beitrag »Einstein und der Kreiselkompass«. Aus Anlass eines Patentstreits über Kreiselkompasse, zu dem er 1915 als Experte gehört wurde, dachte Einstein über die kreisende Bewegung der Elektronen in der Magnetnadel des gewöhnlichen Kompasses nach. Dass diese für den Ferromagnetismus verantwortlich sein müsse, lag nahe; aber bisher hatte niemand den Zusammenhang zwischen Kreisbewegung und Magnetfeld experimentell zeigen können. Die Ausrichtung des Kreiselkompasses durch die Erdrotation brachte Einstein auf ein Experiment, um diese Hypothese zu prüfen: Wenn ein unmagnetischer Eisenzylinder plötzlich magnetisiert wurde, sollte das die Bahnbewegungen der Elektronen ausrichten – und dies müsste den gesamten Zylinder in eine leichte Drehbewegung versetzen. Die diffizilen Experimente, die Einstein zusammen mit W. J. de Haas durchführte, waren ein großer Erfolg, allerdings lagen die Vorhersagen genau um einen Faktor zwei daneben. Erst später stellte sich heraus, dass eine Besonderheit der Elektronenspins für diese Abweichung verantwortlich war – diesmal hatte die Quantenmechanik, die Einstein mit Skepsis betrachtete, das letzte Wort.

Das Buch ist schön gestaltet und bebildert, liegt gut in der Hand und ist wunderbar zum Schmökern geeignet. Naturgemäß kommt es unter den vielen Essays zu einigen Wiederholungen, was aber kaum stört – im Gegenteil: Man kann überall leicht einsteigen, allerdings nicht per Stichwortsuche, denn ein Sachregister fehlt. Und das Stöbern lohnt sich! An vielen Stellen warten Geschichten und kleine Anekdoten auf den Leser, zum Beispiel die von dem automatischen Beton-Volkskühlschrank »Citogel«, den Leo Szilard und Albert Einstein entwickelt haben.

Wer sich allerdings darauf freut, endlich die Relativitätstheorie zu verstehen, wird etwas enttäuscht. Der Inhalt der Theorien wird meistens eher angedeutet als erklärt, und zum mathematischen Handwerkszeug, wie Vierervektoren oder Differenzialgeometrie, findet sich gar nichts. Mathematikscheuen Lesern mag das ein leichtes Gruseln ersparen – aber manchmal bleibt das leichte Gefühl zurück, dass theoretische Physik eine Geheimwissenschaft sei, die sich Außenstehenden kaum erklären lässt.

Einsteins selbst sah das anders: Er hielt 1931 in Berlin einen Vortrag »Was der Arbeiter von der Relativitätstheorie wissen muss«. Und dieser Vortrag, erfahren wir, zeigte auf jeden Fall Wirkung auf kulturellem Gebiet. Er soll Bertolt Brecht Anregungen für sein Schauspiel »Leben des Galilei« gegeben haben – ein Theaterstück, das Einstein wiederum sehr beeindruckte.

Wer mehr über Albert Einstein erfahren möchte, sei auf die Webseiten www.einsteinjahr.de, www.einsteinausstellung.de und www.alberteinstein.info verwiesen.

Wolfram Liebermeister

Der Rezensent ist promovierter Physiker und arbeitet am Max-Planck-Institut für molekulare Genetik in Berlin an der mathematischen Modellierung biologischer Systeme.



BIOGRAFIE

Denis Brian

Einstein

Sein Leben

Aus dem Amerikanischen von Christine von Samson-Mark.
VCH-Wiley, Weinheim 2005. 744 Seiten, € 34,90

Der amerikanische Publizist Denis Brian hatte für sein Einstein-Buch einen günstigen Zeitpunkt getroffen: Eine Fülle von Material war erst vor Kurzem zugänglich geworden, und einige noch lebende Zeitzeugen konnte Brian noch befragen. So sah sich der Autor in der Lage, »die zuvor fehlenden Mosaiksteine zu Einsteins Privatleben zusammenzusetzen« und »zum ersten Mal … fast alles über Einstein« zu erzählen.

Gemessen an dieser vollmundigen Ankündigung im Vorwort ist das Ergebnis mager. Wichtiges und Belangloses stehen bunt durcheinander – wie das so ist, wenn man die Kiste mit den gesammelten Briefen zum ersten Mal aufmacht. Häufig überwuchern die vielen Zitate die Rahmenerzählung.

Was erfahren wir Neues über den privaten Einstein? Dass er mit Mileva Maric eine voreheliche Tochter hatte, von der in späteren Jahren keine Spur mehr aufzufinden war, steht schon in anderen Biografien. Über sein Verhältnis zu Frauen, das »bislang im Verborgenen geblieben« war, kann auch Brian nur wenig Erhellendes beitragen. »Zwei Ehefrauen bescheinigten ihm sein Versagen als Ehemann«, er selbst scheint sich ähnlich eingeschätzt zu haben. Nach heutigen Maßstäben müsste ein Urteil über ihn wohl deutlich milder ausfallen.

Vor allem für seine späteren Jahre ergibt sich das grundsympathische Bild eines Mannes, der die Folgen seines Weltruhms in grandios souveräner Weise bewältigte. Bei aller öffentlichen Aufmerksamkeit fand er sich nicht dazu bereit, seine Haare zu kämmen oder die üblichen Kleidungskonventionen einzuhalten. Eigentlich ein eher menschenscheuer Typ, antwortete er freundlich, humorvoll und gelegentlich sarkastisch auf die abwegigsten Fragen. Stets war er bereit seine Popularität einzusetzen, um einem Menschen zu helfen, dem Unrecht geschah.

Nach dem Zweiten Weltkrieg machten ihm viele seiner amerikanischen Landsleute zum Vorwurf, dass er zwar die Hexenjagd der McCarthy-Ära anprangerte, aber zu den unvergleichlich schlimmeren Grausamkeiten des Sowjetregimes schwieg. Einstein konterte mit der ebenso zutreffenden wie unbefriedigenden Begründung, ein Protest bei Stalin sei nicht nur aussichtslos, sondern könne die Situation möglicherweise noch verschlimmern. Hier ebenso wie bei seinem Pazifismus, den er angesichts der Nazigräuel erheblich einschränken musste, erlebt man Einstein weniger als den genialen Wissenschaftler denn als einen Menschen, der mit den moralischen Dilemmata seiner Zeit konfrontiert war – und auch keine besseren Antworten darauf hatte als seine Zeitgenossen.

Es sieht aus, als wäre wegen des insgesamt schwachen Textes bei großem Umfang dem deutschen Verlag die Liebe zu dem Buchprojekt abhanden gekommen. Er hat die Sache nicht nur fast zehn Jahre liegen lassen – die Originalveröffentlichung war 1996 –, sondern auch eine grottenschlechte Übersetzung akzeptiert. Das ist ein deutscher Text, den man nicht verschlingt, sondern mühsam herunterwürgen muss. Viele Schreib- und Satzstellungsfehler sind unkorrigiert stehen geblieben. Nur zur letzten Konsequenz, der Einstellung des Buchprojekts, konnte man sich im Jubiläumsjahr wohl doch nicht durchringen.

Christoph Pöppe

Der Rezensent ist Redakteur bei Spektrum der Wissenschaft.

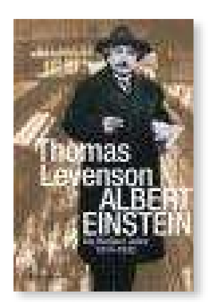
BIOGRAFIE

Thomas Levenson

Albert Einstein

Die Berliner Jahre 1914–1932

Aus dem Englischen von Yvonne Badal.
C. Bertelsmann, München 2005. 542 Seiten, € 24,90



Albert Einstein lebte von 1914 bis 1932 in Berlin – eine wissenschaftlich wie historisch bedeutsame Zeit in Deutschland. Erster Weltkrieg, Weltwirtschaftskrise, die goldenen Jahre der Weimarer Republik und die sich anbahnende Nazidiktatur fallen in diese Jahre. Der berühmte Physiker vollendete in dieser Zeit seine Allgemeine Relativitätstheorie, legte mit seiner Arbeit über den Photoeffekt einen wichtigen Baustein der Quantentheorie und erhielt dafür den Physik-Nobelpreis. Nach Berlin gelockt hatten den gebürtigen Ulmer und Schweizer Staatsbürger Einstein die beiden Koryphäen der Kaiser-Wilhelm-Gesellschaft Max Planck und Walther Nernst; verlassen musste der zum Held gewordene Einstein Berlin, weil das Leben für ihn als Juden in den früheren 1930er Jahren zu riskant wurde.

Was waren die Wechselwirkungen zwischen dem genialen Physiker und Berlin? Wie beeinflusste ihn die Politik?

Wo trat er gesellschaftlich in Erscheinung? Solchen Fragen widmet sich der britische Dokumentarfilmer Thomas Levenson in seinem Mammutwerk, an dem er neun Jahre gearbeitet hat. Das klingt langatmig. Ist es das auch? Das Buch beginnt mit dem jungen Albert, der in der Schweiz studiert, und endet mit Einsteins Tod 1955 – soweit ganz normal für eine Lebensgeschichte. Allerdings erfährt der Leser auf den Seiten dazwischen nicht nur Einsteins Werdegang, vielmehr findet er sich in einem Gemisch aus Biografie und Geschichtsbuch wieder.

So schildert Levenson seitenlang, wie es zum Ersten Weltkrieg kam, wie die zähen Kämpfe an der Westfront verliefen und durch welche politischen Fehler der etablierten Parteien es Hitler schaffte, an die Macht zu kommen. Dieses akkurate, weitschweifige Durchkauen der deutschen Geschichte erklärt sich vielleicht dadurch, dass die im Original angesprochene US-amerikanische Leserschaft weniger mit der europäischen Geschichte vertraut ist. Konsequenterweise versucht Levenson dann auch, die politischen Momente im Wirken Einsteins zu betonen. Dazu gehört unter anderem seine Freundschaft mit dem 1922 ermordeten Außenminister Walther Rathenau, den er wenige Wochen vor dem Attentat zum Rücktritt bewegen wollte.

Doch keine Einstein-Biografie kann an den wissenschaftlichen Leistungen ihres Helden vorbeigehen. Und wie die meisten Biografen verhaspelt sich auch Levenson dabei an ein paar Stellen. So ist eine beschleunigende Rakete mit zwei Uhren an Bord nicht geeignet, um den unterschiedlich schnellen Gang zweier Uhren in einem inhomogenen Gravitationsfeld zu erläutern. Es ist auch falsch, dass die Relativitätstheorie jenseits des Ereignishorizontes eines Schwarzen Lochs versagt.

Schön ist dagegen, dass Levenson ein feines Detail in der zwischen Niels Bohr und Einstein ausgetragenen Diskussion um die Quantentheorie erklärt: Eines der Gedankenexperimente, mit denen Einstein die Quantenmechanik auszuhebeln versuchte, konnte Bohr nur mit der Allgemeinen Relativitätstheorie entkräften – also Einsteins eigenem Kind. Dass Levenson in dem Buch Platz für derartige wissenschaftliche Diskurse hat, versöhnt den Leser mit der Überlänge.

Der Autor erreicht das entscheidende Ziel einer Biografie: den Menschen hinter dem genialen Wissenschaftler spürbar zu machen. Insofern sind »Die Berliner Jahre« ein gelungenes Buch, das obendrein mit 40 Seiten Anmerkungen sowie Personen- und Sachregister ausgesprochen gründlich recherchiert wirkt. Wer sich durch den nur durch 32 Bildseiten aufgeheiterten Haupttext gekämpft hat, wird es nicht bereuen – wohl aber fragen, ob es nicht auch etwas knapper gegangen wäre.

Stefan Gillessen

Der Rezensent ist Postdoc am Max-Planck-Institut für extraterrestrische Physik in Garching.

PHILOSOPHIE

Palle Yourgrau

Gödel, Einstein und die Folgen

Vermächtnis einer ungewöhnlichen Freundschaft

Aus dem Englischen von Kurt Beginnen und Susanne Kuhlmann-Krieg.
C.H.Beck, München 2005. 235 Seiten, € 19,90



Das erste Drittel des 20. Jahrhunderts war geprägt von wissenschaftlichen Revolutionen wie keine andere Epoche. Physik und Mathematik warteten mit Erkenntnissen auf, welche die Grundfesten des Weltbilds zutiefst erschütterten. Zwei bedeutende Denker dieser Jahre waren Albert Einstein (1879–1955) und Kurt Gödel (1906–1978). Die beiden lernten sich jedoch nicht in Europa kennen, sondern erst 1942, nachdem sie vor den Nazis geflüchtet waren und am Institute for Advanced Study in Princeton eine neue berufliche Heimat gefunden hatten. Die Geschichte der ungleichen Freunde Einstein und Gödel ist das Thema des Buchs von Palle Yourgrau, einem amerikanischen Philosophen, der an der Brandeis University in der Nähe von Boston lehrt.

Der junge Gödel wurde mit einem Schlag berühmt, als er 1931 zeigen konnte, dass es in einem widerspruchsfreien – nicht zu trivialen – Axiomen- ▷

ANZEIGE

PREISRÄTSEL

Radwechsel

Von Pierre Tougne

Zwei Radfahrer befinden sich auf dem Weg von Adorf nach Bedorf. Sechzig Kilometer vor Bedorf hat eines der beiden Räder einen Platten. Die beiden beschließen, das fahrbereite Rad auf der verbleibenden Strecke zu teilen. Während der eine fährt, geht der andere zu Fuß. Sie starten gemeinsam. Nach einer beliebigen Distanz lässt der Fahrende das Rad am Straßenrand stehen und geht weiter. Der andere geht bis zum Fahrrad, nimmt es und fährt bis zu dem Punkt, an dem er den Vorausgehenden einholt. Dort beginnt das Spiel erneut. Beide gehen mit einer Geschwindigkeit von fünf Kilometern pro Stunde und fahren mit einer Geschwindigkeit von fünfzehn Kilometern pro Stunde.

In welchem Abstand von Bedorf muss der Vorausfahrende das Rad ein letztes Mal liegen lassen, damit beide zeitgleich dort ankommen?

Schicken Sie Ihre Lösung in einem frankierten Brief oder auf einer Postkarte an Spektrum der Wissenschaft, Leserservice, Postfach 104840, D-69038 Heidelberg. Unter den Einsendern der richtigen Lösung verlosen wir drei Allzwecketuis »SwissCard Quattro«. Der Rechtsweg ist ausgeschlossen. Es werden alle Lösungen berücksichtigt, die bis Dienstag, 15. 11. 2005 eingehen.

Lösung zu »Reine Zeitfrage« (September 2005)

»Schatz, es wäre etwa 22 Uhr mitteleuropäischer Zeit, *wenn die Erdachse senkrecht zur Umlaufebene um die Sonne stünde und die Mondbahn nicht gegen die Umlaufebene geneigt wäre und …«*

Gerhard Düsing aus Dortmund argumentierte so:

Ostern fällt auf den ersten Sonntag nach dem ersten Frühlingsvollmond. Da der Rosenmontag 48 Tage vor Ostern liegt, ist der Tag der schicksalhaften Frage 41 Tage vor Ostern. Irgendwann zwischen 34 und 41 Tagen nach diesem Tag ist also der erste Frühlingsvollmond. Da zwischen zwei Vollmonden ungefähr 29 Tage liegen, ist zwischen fünf und zwölf Tagen nach dem Schicksalstag ebenfalls Vollmond.

Es kann an diesem Tag also nur zunehmender Halbmond sein: Von der Erde aus gesehen stehen Sonne und Mond im rechten Winkel zueinander, und unter den oben genannten vereinfachenden Voraussetzungen läuft der Mond der Sonne auf ihrer gemeinsamen scheinbaren Bahn um die Erde um 90 Grad oder sechs Stunden hinterher.

Der Schicksalszeitpunkt liegt also sechs Stunden nach der Zeit, als die Sonne, von Sacré-Coeur aus gesehen, durch den Eiffelturm schien. Diese Richtung ist ungefähr Südwesten, genauer: um 48 Grad im Uhrzeigersinn von der Südrichtung abweichend, wie einem Stadtplan von Paris zu entnehmen ist. Seit 12 Uhr ist die Sonne also um 48 Grad weitergewandert.

Das entspricht einer Zeit von 1440 Minuten · (48°/360°) = 192 Minuten; also: Sonne hinter Eiffelturm 15.12 Uhr, Mond hinter Eiffelturm 21.12 Uhr. Allerdings hat Paris Mitteleuropäische Zeit (MEZ). Diese stimmt mit der Ortszeit bei 15 Grad östlicher Länge überein. Da Paris aber nur etwa 2,3 Grad östlich von Greenwich liegt, ist die MEZ der Ortszeit um etwa 51 Minuten voraus. Das heißt, es wäre also bereits ein paar Minuten nach 22 Uhr MEZ.

»Genauer, Schatz, werden wir natürlich, *wenn wir beachten, dass die Erdachse gegen die Ekliptik um etwa 23,5 Grad geneigt ist, und die Auslenkung des Monds aus der Umlaufebene der Erde um die Sonne wegen der Schiefe der Mondbahn mit berücksichtigen …«*

Vor allem aber: Um die 48 Grad Azimutwinkel (»Winkel am Horizont«) zwischen der Südrichtung und der Richtung Sacré-Coeur – Eiffelturm zurückzulegen, braucht die Sonne nicht 48 Grad auf ihrer eigenen, gegenüber der Horizontalen um 48° 51′ (das ist die geografische Breite von Paris) geneigten Bahn, sondern deutlich weniger.

Berthold Hajen aus Boppard machte mit seinen Berechnungen deutlich, dass solche Überlegungen nicht unerheblich sind: An den möglichen Schicksalstagen (zwischen dem 9. und dem 29. Februar) liegen die Uhrzeiten für unser Halbmondereignis zwischen 20.29 Uhr und 21.08 Uhr MEZ.

»Allerdings, Schatz, können wir natürlich *auch nicht genau erkennen, ob es nun wirklich Halbmond ist. Dies ist nämlich sehr unwahrscheinlich, weil der exakte Halbmond jeden Monat in einer anderen Himmelsrichtung zu finden ist …«*

Gerhard Batz aus Taunusstein fand heraus, dass die geschilderte Geschichte sich letztmalig am 26. Februar 1996 abgespielt haben kann. Dabei stand der annähernd halbe Mond etwa um 21.21 Uhr MEZ in der besagten Richtung. Ein astronomisches Tafelwerk oder Programm zeigt jedoch, dass an diesem Termin der exakte Halbmond, das heißt der Zeitpunkt, zu dem Sonne und Mond rechtwinklig zueinander standen, bereits um 5.52 Uhr MEZ stattfand.

Für weitere Berechnungen findet man Applets im Internet, zum Beispiel unter http://www.jgiesen.de/GeoAstro/index.htm. Dort findet sich auch das kleine Programm »Sonne, Mond & Erde«, mit dem man die Mondposition in Paris nachspielen kann.

»Auf jeden Fall, Schatz, ist es jetzt genau 16 Minuten später als zu der Zeit, als du mir die schicksalhafte Frage gestellt hast!«, sagte Horst, als er seine Ausführungen beendete und auf die Uhr schaute. – Aber da war sie längst in seinen Armen eingeschlafen.

Die Gewinner der drei Standfiguren »Einstein« sind Hartmut Riman, Augsburg; Lutz Dressler, Erkrath; und Gernot Singer, Wien.

Lust auf noch mehr Rätsel? Unser Wissenschaftsportal wissenschaft-online (www.wissenschaft-online.de) bietet Ihnen unter dem Fachgebiet »Mathematik« jeden Monat eine neue mathematische Knobelei.

system stets wahre Aussagen gibt, die nicht beweisbar sind. Diese Entdeckung war eine Sensation für die Mathematik, ähnlich wie die Relativitätstheorien für die Physik: Einstein zeigte, dass die Vorstellung falsch ist, Raum und Zeit seien nur die Bühne für das physikalische Geschehen. Im Alter von 37 Jahren ersetzte er den absoluten Raum und die absolute Zeit durch die abstraktere Raumzeit, deren Struktur durch die Verteilung der Materie bestimmt wird.

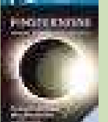
Diese Errungenschaften bildeten die Basis für eine Freundschaft, welche die beiden in Princeton vor allem durch gemeinsame Spaziergänge pflegten. Vermutlich diskutierten sie dabei über ihre Projekte: Einstein arbeitete an einer geometrischen Vereinheitlichung der Physik, Gödel an einem Beweis der Kontinuumshypothese. Beide Versuche blieben ergebnislos. Außerdem verband die beiden die Tatsache, dass Gödel eine Lösung der Einstein'schen Gleichungen gefunden hatte, die ein rotierendes Universum beschreibt.

Erstaunlicherweise gibt es in dieser Lösung geschlossene zeitartige Bahnen – was Zeitreisen ermöglichen würde. Gödel argumentierte daraufhin, dass man dies als Beweis für die Nichtexistenz der Zeit ansehen müsse. Spätestens dieses frappierende Ergebnis zeigt, dass Gödel nicht nur Mathematiker war, sondern auch als Philosoph verstanden werden muss. Und genau dies ist die These des vorliegenden Buchs. Yourgrau erzählt nicht nur die Geschichte zweier Freunde, er benutzt sie vielmehr, um seine eigentliche Aussage zu untermauern: Die zeitgenössische Philosophie habe den Denker Kurt Gödel sträflich vernachlässigt. Das geht natürlich über ein populärwissenschaftliches Buch hinaus; obendrein hatte Yourgrau die gleiche Thematik schon in einem Buch speziell für Berufsphilosophen behandelt.

Das Gerüst des Textes sind die Biografien der beiden Wissenschaftler, in die Erklärungen zu den jeweiligen Arbeiten eingebaut sind. Yourgrau konzentriert sich dabei sinnvollerweise auf Gödel, denn allgemeinverständliche Einführungen in die Relativitätstheorien gibt es ja wirklich genug.

Aber Yourgrau bleibt zu wissenschaftlich. Bereits die kompakte Vorstellung des Positivismus gerät zu einem schwer verdaulichen Dickicht von Theorien und Namen. Ebenso ungenießbar ist sein ▷

Die 5x5-Rezension des Monats von wissenschaft-online

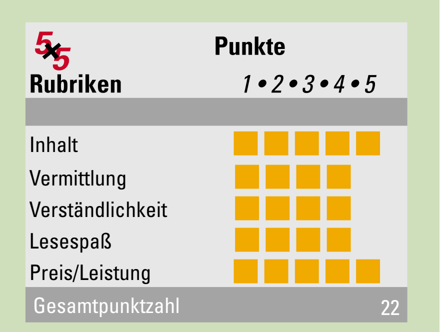


Peter Friedrich, Susanne Friedrich
Finsternisse verstehen, beobachten und fotografieren
Sonnenfinsternisse, Mondfinsternisse und Transite
Mit Daten und Karten zur Finsternis 2006 in der Türkei
Oculum, Erlangen 2005, 79 Seiten, € 7,90

Was nimmt ein Sternfreund zu einer Sonnenfinsternis mit? Teleskop und Fotoausrüstung, natürlich. Astronomiebücher, Nachschlagewerke und Finsternistabellen müssen auch mit – ärgerlich nur, dass sie schwer und sperrig sind. Da kommt der neue Interstellarum-Begleiter wie gerufen: Dieses Büchlein passt in den vollsten Koffer.

Das Werk ist für seinen Zweck bestens geeignet. Wer auf freiem Feld steht und beobachtet, hat mit einem Griff in die Hosentasche und kurzem Nachschlagen meist die benötigte Auskunft parat. Kein langes Suchen, kein Blättern in dicken Wälzern, kein entnervtes Überfliegen unwichtiger Information, während kostbare Beobachtungszeit verrinnt.

Aus der Rezension von Frank Schubert



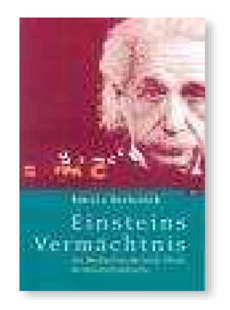
Den kompletten Text und zahlreiche weitere Rezensionen von wissenschaft-online finden Sie im Internet unter
http://www.wissenschaft-online.de/rezensionen

▷ Versuch, den Gödel'schen Satz zu erklären. Wer versteht schon so langatmige Sätze wie diesen? »Diese Repräsentation geschieht vermittels der Arithmetisierung der FA-Syntax, sodass es zu einer gegebenen syntaktischen Wahrheit Bew(x,y) der MFA eine dieser entsprechende arithmetische Wahrheit *Bew*(*x*,*y*) in IA gibt, die ihrerseits einer Formel **Bew(x,y)** der FA entspricht, was nichts anderes heißt, als dass die Folge von Formeln mit der Gödel-Nummer x die Formel mit der Gödel-Nummer y beweist und dieser Beweis **Bew(x,y)** in FA ein Satz ist.« Gerade eine verständliche Beschreibung der wichtigsten Arbeit Gödels wäre aber das zentrale Element, um die wissenschaftliche Bedeutung des Wiener Mathematikers zu verstehen.

Im letzten Teil des Buchs stellt der Autor dann ziemlich unkritisch die Argumentation vor, mit der Gödel zeigen wollte, dass die Zeit nicht existiert. Dabei hat die Physik gute Gründe, Gödel in diesem Punkt nicht zu folgen: Es ist keineswegs klar, dass alle möglichen Lösungen der Einsteingleichungen physikalisch relevant sind. Außerdem ist die Relativitätstheorie bekanntermaßen unvollständig: Sie kann die Welt im Kleinen nicht beschreiben – ihr fehlen die Quantenaspekte, die ihrerseits genauso wichtige Implikationen für die Zeit haben. Yourgrau kann oder will dies aber nicht aufgreifen, da es seine These vom zu Unrecht vergessenen Gödel abschwächen würde.

Stefan Gillessen

Der Rezensent ist Postdoc am Max-Planck-Institut für extraterrestrische Physik in Garching.



GRAVITATIONSPHYSIK

Marcia Bartusiak

Einsteins Vermächtnis

Der Wettlauf um das letzte Rätsel der Relativitätstheorie

Aus dem amerikanischen Englisch von Sebastian Wohlfeil.
Europäische Verlagsanstalt, Hamburg 2005. 336 Seiten, € 22,90

Warum hängen Länge und Zeit vom Bezugssystem ab? Und warum wird Licht durch Masse abgelenkt? Die meisten der Vorhersagen aus der Allgemeinen Relativitätstheorie von 1915 haben sich im Lauf des letzten Jahrhunderts experimentell beweisen lassen und müssen heute zum Beispiel im Satellitennavigationssystem GPS mit einberechnet werden. Nur eine letzte Frage bleibt noch offen: Gibt es Gravitationswellen?

Sehr große Massen in Bewegung, wie zwei sich umkreisende Schwarze Löcher, zerren nach Einsteins Theorie am Gewebe der Raumzeit und senden Gravitationswellen aus, die alles durchdringen und deren Frequenz im hörbaren Bereich liegt. Das »Rumpeln« der Raumzeit oder, romantischer ausgedrückt, die Musik des Universums fügt dem Stummfilm aus den Bildern der astronomischen Teleskope den Ton hinzu. Aber auch nach einem halben Jahrhundert intensiver Forschungsarbeit ist die direkte Messung von Gravitationswellen noch nicht gelungen.

Das ist das Thema des vorliegenden Buchs, das im Original einen viel poetischeren Titel hat: »Einstein's Unfinished Symphony. Listening to the Sounds of Space-Time.« Marcia Bartusiak hat Journalismus und Physik studiert und schreibt seit über zwanzig Jahren populärwissenschaftliche Bücher über Physik und Astronomie.

Ihr Buch beginnt mit der Entwicklung des Verständnisses der Gravitation sowie von Raum und Zeit von der Antike über Newton bis zu Einstein. Die komplizierten Phänomene aus der Allgemeinen Relativitätstheorie erklärt sie anschaulich Schritt für Schritt mit Hilfe von Bildern, soweit das eben möglich ist.

Von den ersten Antennen 1963 bis heute wurde die Suche nach Gravitationswellen von starken Persönlichkeiten vorangetrieben. Der Leser taucht ein in die Welt der Wissenschaftler, spürt die Faszination, die sie antreibt, und die Aufregung bei neuen Entdeckungen. Nicht nur harte Arbeit, Forschungsdrang und Ideenreichtum, sondern auch Glück und Zufall bestimmen über ihren Erfolg. Und so schreibt die Autorin auch über Konkurrenz und falsche Erfolgsmeldungen im spannenden Wettlauf um den ersten Empfang von Gravitationswellen.

Mit den immens großen Detektoren, die zurzeit auf der ganzen Welt im Aufbau sind, müssten in Zusammenarbeit mit den Theoretikern die Gravitationswellen bald nachgewiesen werden können. Aus dem Text wird klar, warum der Nachweis so schwierig ist: Gravitationswellen haben eine sehr geringe Wechselwirkung mit Materie; die 4 Kilometer langen Arme der Detektoren auf der Erde werden beim Durchlaufen einer starken Welle nur um wenige millionstel Milliardstelmeter gestreckt – ungefähr den Durchmesser eines Atomkerns.

Wenn die Techniken aber weit genug entwickelt sind und die Empfindlichkeit der Geräte hoch genug ist, werden die Explosionen von schweren Sternen am Ende ihrer Lebenszeit, so genannte Supernovae, und die Kollision von Neutronensternen oder Schwarzen Löchern »hörbar« werden. Vielleicht wird auch das Nachgrollen des Urknalls zu hören sein, das Aufschluss über den Beginn des Universums geben kann. Die Wissenschaftler erhoffen sich auch viele unerwartete Signale, die es bisher jedes Mal



Teilnehmer der Feier zu Einsteins 70. Geburtstag (v. l. n. r.): Eugene Wigner, Hermann Weyl, Kurt Gödel, Isidor Isaac Rabi, Albert Einstein, Rudolf Ladenburg, J. Robert Oppenheimer



Das Laser-Interferometer-Gravitationswellen-Observatorium (LIGO) in den Kiefernwäldern von Livingston (Louisiana). Seine beiden je vier Kilometer langen Arme verlaufen in der Bildmitte nach oben und nach rechts.

gab, wenn eine neue Beobachtungstechnik die Astronomie bereicherte.

Mit dem Nachweis von Gravitationswellen würde Einsteins Theorie vollends bestätigt werden und ein neues Bild des Universums entstehen. Bartusiak sieht die Gelegenheit, »Chronistin für das Heraufdämmern einer gänzlich neuen Form der Astronomie« zu werden. Das gelingt ihr bis zum Stand der Forschung im Jahr 2000, in dem die Originalausgabe veröffentlicht wurde. Die Autorin hat nicht nur alle wichtigen Personen interviewt, sondern auch alle Standorte besucht und gibt die Atmosphäre der teilweise schon historisch bedeutenden Forschungsstätten treffend wieder. Der wissenschaftliche Rahmen wird durch Anekdoten, wie die zur Herkunft des Begriffs »Schwarzes Loch«, und teilweise etwas langwierig geratene Beschreibungen der Zusammenhänge und Beziehungen aufgelockert. Das Buch ist dadurch gut lesbar und interessant.

Bleibt nur zu hoffen, dass die Mühen der vielen engagierten Wissenschaftler endlich belohnt werden. Die letzten Sätze der Autorin stimmen auf die erwartete neue Ära der Astronomie ein: »Zunächst werden nur ein paar Noten auftauchen. Mit der Zeit sollte jedoch eine Melodie entstehen, die zu einer prächtigen, eindrucksvollen Symphonie anschwillt. Und wenn das geschieht, werden Astronomen endlich in der Lage sein, die verborgenen Rhythmen des Universums aufzuspüren.«

Elena Hassinger

Die Rezensentin studiert Physik in Heidelberg.

PREISRÄTSEL

Radwechsel

Von Pierre Tougne

Zwei Radfahrer befinden sich auf dem Weg von Adorf nach Bedorf. Sechzig Kilometer vor Bedorf hat eines der beiden Räder einen Platten. Die beiden beschließen, das fahrbereite Rad auf der verbleibenden Strecke zu teilen. Während der eine fährt, geht der andere zu Fuß. Sie starten gemeinsam. Nach einer beliebigen Distanz lässt der Fahrende das Rad am Straßenrand stehen und geht weiter. Der andere geht bis zum Fahrrad, nimmt es und fährt bis zu dem Punkt, an dem er den Vorausgehenden einholt. Dort beginnt das Spiel erneut. Beide gehen mit einer Geschwindigkeit von fünf Kilometern pro Stunde und fahren mit einer Geschwindigkeit von fünfzehn Kilometern pro Stunde.

In welchem Abstand von Bedorf muss der Vorausfahrende das Rad ein letztes Mal liegen lassen, damit beide zeitgleich dort ankommen?

Schicken Sie Ihre Lösung in einem frankierten Brief oder auf einer Postkarte an Spektrum der Wissenschaft, Leserservice, Postfach 104840, D-69038 Heidelberg. Unter den Einsendern der richtigen Lösung verlosen wir drei Allzwecketuis »SwissCard Quattro«. Der Rechtsweg ist ausgeschlossen. Es werden alle Lösungen berücksichtigt, die bis Dienstag, 15. 11. 2005 eingehen.

Lösung zu »Reine Zeitfrage« (September 2005)

***»Schatz, es wäre etwa 22 Uhr mitteleuropäischer Zeit,** wenn die Erdachse senkrecht zur Umlaufebene um die Sonne stünde und die Mondbahn nicht gegen die Umlaufebene geneigt wäre und …«*

Gerhard Düsing aus Dortmund argumentierte so:

Ostern fällt auf den ersten Sonntag nach dem ersten Frühlingsvollmond. Da der Rosenmontag 48 Tage vor Ostern liegt, ist der Tag der schicksalhaften Frage 41 Tage vor Ostern. Irgendwann zwischen 34 und 41 Tagen nach diesem Tag ist also der erste Frühlingsvollmond. Da zwischen zwei Vollmonden ungefähr 29 Tage liegen, ist zwischen fünf und zwölf Tagen nach dem Schicksalstag ebenfalls Vollmond.

Es kann an diesem Tag also nur zunehmender Halbmond sein: Von der Erde aus gesehen stehen Sonne und Mond im rechten Winkel zueinander, und unter den oben genannten vereinfachenden Voraussetzungen läuft der Mond der Sonne auf ihrer gemeinsamen scheinbaren Bahn um die Erde um 90 Grad oder sechs Stunden hinterher.

Der Schicksalszeitpunkt liegt also sechs Stunden nach der Zeit, als die Sonne, von Sacré-Coeur aus gesehen, durch den Eiffelturm schien. Diese Richtung ist ungefähr Südwesten, genauer: um 48 Grad im Uhrzeigersinn von der Südrichtung abweichend, wie einem Stadtplan von Paris zu entnehmen ist. Seit 12 Uhr ist die Sonne also um 48 Grad weitergewandert.

Das entspricht einer Zeit von 1440 Minuten · (48°/360°) = 192 Minuten; also: Sonne hinter Eiffelturm 15.12 Uhr, Mond hinter Eiffelturm 21.12 Uhr. Allerdings hat Paris Mitteleuropäische Zeit (MEZ). Diese stimmt mit der Ortszeit bei 15 Grad östlicher Länge überein. Da Paris aber nur etwa 2,3 Grad östlich von Greenwich liegt, ist die MEZ der Ortszeit um etwa 51 Minuten voraus. Das heißt, es wäre also bereits ein paar Minuten nach 22 Uhr MEZ.

***»Genauer, Schatz, werden wir natürlich,** wenn wir beachten, dass die Erdachse gegen die Ekliptik um etwa 23,5 Grad geneigt ist, und die Auslenkung des Monds aus der Umlaufebene der Erde um die Sonne wegen der Schiefe der Mondbahn mit berücksichtigen …«*

Vor allem aber: Um die 48 Grad Azimutwinkel (»Winkel am Horizont«) zwischen der Südrichtung und der Richtung Sacré-Coeur – Eiffelturm zurückzulegen, braucht die Sonne nicht 48 Grad auf ihrer eigenen, gegenüber der Horizontalen um 48° 51′ (das ist die geografische Breite von Paris) geneigten Bahn, sondern deutlich weniger.

Berthold Hajen aus Boppard machte mit seinen Berechnungen deutlich, dass solche Überlegungen nicht unerheblich sind: An den möglichen Schicksalstagen (zwischen dem 9. und dem 29. Februar) liegen die Uhrzeiten für unser Halbmondereignis zwischen 20.29 Uhr und 21.08 Uhr MEZ.

***»Allerdings, Schatz, können wir natürlich** auch nicht genau erkennen, ob es nun wirklich Halbmond ist. Dies ist nämlich sehr unwahrscheinlich, weil der exakte Halbmond jeden Monat in einer anderen Himmelsrichtung zu finden ist …«*

Gerhard Batz aus Taunusstein fand heraus, dass die geschilderte Geschichte sich letztmalig am 26. Februar 1996 abgespielt haben kann. Dabei stand der annähernd halbe Mond etwa um 21.21 Uhr MEZ in der besagten Richtung. Ein astronomisches Tafelwerk oder Programm zeigt jedoch, dass an diesem Termin der exakte Halbmond, das heißt der Zeitpunkt, zu dem Sonne und Mond rechtwinklig zueinander standen, bereits um 5.52 Uhr MEZ stattfand.

Für weitere Berechnungen findet man Applets im Internet, zum Beispiel unter http://www.jgiesen.de/GeoAstro/index.htm. Dort findet sich auch das kleine Programm »Sonne, Mond & Erde«, mit dem man die Mondposition in Paris nachspielen kann.

»Auf jeden Fall, Schatz, ist es jetzt genau 16 Minuten später als zu der Zeit, als du mir die schicksalhafte Frage gestellt hast!«, sagte Horst, als er seine Ausführungen beendete und auf die Uhr schaute. – Aber da war sie längst in seinen Armen eingeschlafen.

Die Gewinner der drei Standfiguren »Einstein« sind Hartmut Riman, Augsburg; Lutz Dressler, Erkrath; und Gernot Singer, Wien.

Lust auf noch mehr Rätsel? Unser Wissenschaftsportal wissenschaft-online (www.wissenschaft-online.de) bietet Ihnen unter dem Fachgebiet »Mathematik« jeden Monat eine neue mathematische Knobelei.

Wann begann das moderne Denken?

Viel früher als geglaubt entwickelte der moderne *Homo sapiens* Verstand und Kreativität

RANDY HARRIS

WEITERE THEMEN IM DEZEMBER

Einstein in der Chemie

Die Relativitätstheorie sei im Alltag ohne Bedeutung, heißt es. Ein großer Irrtum! Gälte sie nicht, wäre Gold nicht gelb, Quecksilber nicht flüssig und Wolfram nicht für Glühbirnen geeignet



JACK UNRUH

Ist das All falsch gestimmt?

Die »Musik« der kosmischen Hintergrundstrahlung weist mysteriöse Diskrepanzen auf. Entweder sind die Messungen falsch – oder das Universum ist seltsamer als vermutet



MIT FRDL. GEN. VON: AMERICAN COLLEGE OF RHEUMATOLOGY

Wolfskrankeit

Für die Autoimmunerkrankung Lupus erythematodes könnten bald bessere Behandlungsmethoden zur Verfügung stehen

SERIE: DIE WELT IM JAHR 2050 Teil III



NASA

Handeln für die Gesundheit

Rasche Maßnahmen gegen Epidemien und chronische Krankheiten

Wohlstand für alle?

Globales Wirtschaften in einem endlichen Ökosystem

Gute Luft als Ware

Chancen und Grenzen des Handels mit Verschmutzungsrechten